

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR
LE TITRE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR
Jacky WEILL

1^{re} THÈSE. — Technique des contrôles des réacteurs nucléaires.

2^e THÈSE. — Propositions données par la Faculté

Soutenues le 2 décembre 1953 devant la Commission d'examen.

MM. Y. ROCARD,	<i>Président.</i>
F. PERRIN	} <i>Examineurs</i>
A. KASTLER	

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

Service de Documentation

1954



FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen M. A. CHATELET

PROFESSEURS

G. JULIA	T	Analyse-supérieure et Algèbre supérieure	P. DRACH	T	Zoologie
A. DENJOY	T	Théorie des Fonctions	KASTLER	T	Physique
L. LUTAUD	T	Géographie physique et Géologie dynamique	CHATELET	T	Arithmétique et théorie des nombres
E. DARMOIS	T	Enseignement de Physique	EPHRUSSI	T	Génétique
Robert LEVY	T	Physiologie comparée	WURMSER	T	Biologie physico-chimique
POCH	T	Mécanique physique et expérimentale	BAUER	T	Chimie - Physique
PAUTHENIER	T	Electrotechnique générale	RIVIERE		Géologie (P.C.B.)
De BROGLIE	T	Théories physiques	GAUTHERET	T	Biologie végétale (P.C.B.)
JOB	T	Chimie générale	LUCAS	T	Physique
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées	A. THOMAS	T	Evolution des êtres organisés
COMBES	T	Physiologie végétale	ARNULF		Optique appliquée
GARNIER	T	Géométrie supérieure	Max MORAND		Physique
PERES	T	Mécanique des fluides et applications	SOLEILLET		Physique
LAUGIER	T	Physiologie générale	FORTIER	T	Mécanique expérimentale des fluides
TOUSSAINT	T	Technique aéronautique	DANJON	T	Astronomie
M. CURIE	T	Physique (P.C.B.)	PROMAGEOT	T	Chimie biologique
G. RIBAUD	T	Hautes températures	LAPORTE	T	Physique générale et Radioactivité
CHAZY	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste	JANET	T	Mathématiques générales
CROZE	T	Physique théorique et Physique céleste	PETIT	T	Biologie maritime
DUPONT	T	Théories chimiques	QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique
VALIRON	T	Calcul différentiel et Calcul intégral	GALLIEN	T	Biologie animale (P.C.B.)
BARRABE	T	Géologie structurale et géologie appliquée	EICHORN		Biologie végétale (P.C.B.)
G. DARMOIS	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique	DE CUGNAC		Biologie végétale (P.C.B.)
J. BOURCART	T	Géographie physique et Géologie dynamique	Mlle CAUCHOIS	T	Chimie-Physique
AUBEL	T	Chimie biologique	THELLIER		Physique du Globe
Mme JOLIOU-CURIE	T	Physique générale et Radioactivité	AUDUBERT		Electrochimie
PLANTEFOL	T	Botanique	L'HERITIER		Génétique
CABANNES	T	Recherches physiques	GRIVET	T	Radio Electricité
GRASSE	T	Evolution des êtres organisés	PONCIN		Mécanique des fluides
PREVOST	T	Chimie organique	THIRY	T	Mécanique appliquée
BOULIGAND	T	Application de l'analyse à la Géométrie	DUBREIL		Mathématiques générales
CHAUDRON	T	Chimie appliquée	QUELET		Chimie (P.C.B.)
WYART	T	Minéralogie	CAGNIARD		Géophysique appliquée
TEISSIER	T	Zoologie	CHAMPETIER		Chimie appliquée
MANGENOT	T	Biologie végétale	CUVILLIER		Géologie structurale et Géologie appliquée
P. AUGER	T	Physique quantique et relativité	JUNG	T	Pétrographie
MONNIER		Physiologie générale	TRILLAT		Physique (P.C.B.)
PIVETEAU	T	Géologie	WIEMANN		Chimie (P.C.B.)
ROCARD	T	Physique	JACQUINOT	T	Physique (P.C.B.)
H. CARTAN	T	Mathématiques (E.N. Supérieure)	VASSY		Physique de l'atmosphère
SCHAEFFER	T	Physiologie des fonctions	DESTOUCHES		Théories physiques
LAFFITTE	T	Chimie générale	M. PRUVOST	T	Géologie
FAVARD	T	Mécanique générale	AMIEL		Chimie (P.C.B.)
COULOMB	T	Physique du Globe	HOCART		Minéralogie
Mlle COUSIN	T	Biologie animale (P.C.B.)	MACHEBOEUF		Microbiologie
CHRETIEN	T	Chimie minérale	J.-P. MATHIEU		Physique (P.C.B.)
			COUTEAUX		Biologie animale (P.C.B.)
			MAY		Biologie animale (P.C.B.)
			CHOQUET		Calcul différentiel
			FELDMANN		Biologie (P.C.B.)
			GUINIER	T	Physique (P.C.B.)
			JOST	T	Biologie (P.C.B.)

Secrétaire Ch. MONIER



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41552217_0014

S O M M A I R E

Nous avons abordé le problème de la "Technique du Contrôle des Réacteurs nucléaires" dans le but de réaliser le contrôle du réacteur de Saclay. C'est ainsi que nous avons été amené à étudier le problème dans son ensemble, tel qu'il se pose pour tout réacteur à uranium naturel. Ce travail traite principalement du domaine des mesures à caractère nucléaire et s'étend dans le domaine des mesures non nucléaires, telles que les mesures thermodynamiques, de niveaux, etc... en mettant en relief les caractéristiques nouvelles exigées de la part des détecteurs du fait de leur utilisation dans un flux de neutrons thermiques. Dans le domaine des mesures nucléaires, nous indiquons principalement les réalisations et les résultats obtenus pour les détecteurs de neutrons thermiques et pour la mesure des courants d'ionisation. Nous traitons également du problème technique du démarrage d'un réacteur et du problème de la mesure de la réactivité.

Nous donnons les détails nécessaires à la compréhension de tous les schémas et plans de câblages essentiels mis au point, en particulier, pour le réacteur de Saclay.

AVANT - P R O P O S

Au cours de l'année 1947, le Commissariat à l'Energie atomique entreprit, sous l'impulsion de M. JOLIOT-CURIE, la tâche de construire un premier réacteur nucléaire à eau lourde, le contrôle de ce réacteur devant être réalisé par le Service des Constructions électriques dirigé par M. SURDIN. Au sein de ce service, MM. VALLADAS, POTTIER et RAIEVSKI réalisèrent les premiers travaux relatifs au contrôle des piles. Le présent travail constitue une étude plus développée de la technique du contrôle des piles et comprend un certain nombre de solutions originales. C'est ainsi que nous avons été amené à développer la technique des chambres d'ionisation et celle de l'amplification des courants faibles. Nous décrirons également les techniques que nous avons mises au point en ce qui concerne la mesure de la réactivité d'une pile, les appareillages de santé et les dispositifs de sécurité et de télémesure. Un grand nombre des solutions originales données ici aux problèmes généraux de la technique du contrôle des réacteurs a été utilisé pour le contrôle de la pile de Saclay. Nous avons tenu à donner ici une description plus générale des dispositifs de contrôle et de régulation utilisés pour le contrôle d'un réacteur. Un travail aussi étendu et faisant appel à des techniques diverses ne pouvait être l'oeuvre d'un seul travailleur. Aussi, il m'est ici un devoir, autant qu'un plaisir, de remercier ceux sans lesquels cette réalisation n'aurait pu être complète. Succédant à M. JOLIOT-CURIE, M. le Haut-Commissaire Francis PERRIN a stimulé notre travail par la confiance qu'il a bien voulu nous témoigner en nous confiant la tâche de réaliser le contrôle du réacteur de Saclay.

Sous la direction toujours active de M. SURDIN et grâce à l'expérience qui m'a été inculquée par quatre années de travail

dans le laboratoire de M. ROGOZINSKI, il m'a été possible de réaliser ce travail. Je ne dirai jamais assez combien m'ont été précieux et indispensables les conseils et les enseignements très nombreux que MM. SURDIN et ROGOZINSKI m'ont toujours prodigués.

Je tiens également à souligner l'importante contribution qui a été apportée à la technique décrite ici par MM. LABEYRIE et LALLEMANT dans le domaine des chambres d'ionisation ainsi que par MM. POTTIER et RAIEVSKI dans celui des servomécanismes.

Qu'il me soit permis également de citer ici les agents techniques du laboratoire qui m'ont aidé à entreprendre et à réaliser les appareillages nécessaires. Je citerai particulièrement MM. AVRIL pour les amplificateurs à courant continu, BRIERE pour les électromètres à condensateur vibrant, BRISTEAU pour les résistances de haute valeur et les piles électrodes et RASTOIX pour les mesures de températures, qui m'ont, par leur travail, apporté dans chacun de ces domaines une contribution souvent primordiale.

Je remercierai également MM. LE MEUR, FOGLIA, MARTIN et LEDUC, qui ont facilité ma tâche lors de la réalisation du contrôle de la pile de Saclay et M. COHEN, du Service de Physique nucléaire, dont les conseils m'ont été précieux pour l'étalonnage des détecteurs de neutrons lents.

Il ne me paraît pas possible d'allonger encore la liste de tous ceux qui m'ont aidé dans le travail qui m'a été confié, c'est l'ensemble du Commissariat à l'Energie atomique qu'il me faudrait citer, tant il est vrai que toute réalisation effectuée dans son sein est une oeuvre collective qui fait intervenir la presque totalité de ses différents services.

J'ai cru bon dans le présent travail de m'étendre davantage sur les techniques des mesures nucléaires nécessaires au contrôle des réacteurs, elles seules présentent une contribution nouvelle

aux techniques déjà utilisées par les ingénieurs. J'ai volontairement négligé ici l'important chapitre de la détection des fuites de produits de fission dans les fluides de refroidissement des réacteurs, ce problème n'étant pas encore entré dans le cadre des techniques utilisées à cette date.

INTRODUCTION

LES PILES A URANIUM NATUREL

L'uranium naturel contient 0,7 pour cent de l'isotope 235. Celui-ci a la propriété de se fissionner sous l'action des neutrons dits "thermiques", c'est-à-dire dont l'énergie est de $\frac{1}{40}$ ème d'électron-volt. La fission donne lieu, en particulier, à l'émission de 2 à 3 neutrons. Les neutrons engendrés par les fissions subissent des destinées diverses. Une fraction d'entre eux est perdue par fuite hors du réacteur, une autre fraction est absorbée, une autre fraction encore est capturée par l'uranium 238 pour former entre autres des noyaux de plutonium. Si la somme de ces diverses fractions est telle qu'il subsiste en moyenne plus d'un neutron par fission, ces neutrons pourront créer une nouvelle génération de neutrons plus nombreuse que la précédente et ainsi de suite. Ce processus est appelé la réaction en chaîne.

Si K est le rapport entre les populations de neutrons de deux générations successives, nous aurons dans le cas d'une réaction en chaîne $K > 1$. L'écart entre K et l'unité sera toujours très faible dans le cas d'une pile ; cet écart $\delta K = K - 1$ est appelé la réactivité.

Dans le cas où $\delta K < 0$ (état subcritique), la réaction en chaîne ne peut avoir lieu, il subsistera à partir d'un neutron $\left| \frac{1}{\delta K} \right|$ neutron, c'est-à-dire que l'on se trouvera en présence d'une pile "convergente" vers une valeur finie, toujours faible, de la population des neutrons, c'est-à-dire de la puissance. Signalons que

les neutrons initiaux peuvent être dus à des "sources" de natures diverses, parmi lesquelles nous citerons les neutrons cosmiques, les neutrons de fission spontanée et les neutrons qui ont pour origine les désintégrations radioactives qui subsistent après une marche en régime de réaction en chaîne du réacteur.

Dans le cas où $\delta K = 0$ (état critique), la population des neutrons peut être quelconque (elle dépend des états précédents non nuls de la réactivité) mais constante ; c'est la marche à puissance constante.

Dans le cas où $\delta K > 0$, une forme approchée de la loi de variation en fonction du temps t de la population des neutrons est $N = N_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}}$ où τ est la vie moyenne des neutrons.

La valeur de τ est de l'ordre de 10^{-3} s. Ceci montre que même pour des valeurs faibles de δK la période de la pile est extrêmement brève et de ce fait la pile est difficilement contrôlable. Cependant, cet inconvénient majeur se trouve considérablement atténué par la présence des neutrons dits "retardés" qui sont émis au cours des désintégrations qui suivent chaque fission. La présence de ces neutrons ramène τ à une valeur effective de 10^{-1} s environ, ce qui permet de contrôler la pile, la période pouvant facilement devenir plus grande que plusieurs dizaines de secondes.

Ce sont principalement des considérations sur les valeurs de δK à obtenir pour un contrôle convenable du réacteur qui en déterminent les dimensions une fois le choix du ralentisseur effectué et les puretés des différents matériaux utilisés bien connues.

Ces calculs donnent, pour un réacteur à eau lourde, une cuve de l'ordre de 2 m de diamètre et de 2 m de hauteur lorsqu'on a pris soin de prévoir un réflecteur de graphite de l'ordre de 1 m d'épaisseur entourant complètement la cuve. Le réflecteur de graphite a pour rôle essentiel de diminuer les pertes périphériques

de neutrons. La cuve contiendra environ 3 tonnes d'uranium naturel et 6 tonnes d'eau lourde (fig. 1).

Pour un réacteur à graphite, on trouvera des dimensions de trois à quatre fois supérieures, plusieurs dizaines de tonnes d'uranium et plusieurs centaines de tonnes de graphite [1], [2].

Le protecteur de béton utilisé contre les rayonnements nocifs aura une épaisseur de 30 cm environ pour 1 W de puissance, majorée de 30 cm chaque fois que la puissance prévue pour le réacteur augmente d'une puissance de 10. Il faudra donc 2,40 m de béton autour d'un réacteur de 10 000 kW.

Le contrôle de la puissance du réacteur, c'est-à-dire de la population des neutrons, s'effectue au moyen de plaques ou de barres contenant un élément absorbant comme le bore ou le cadmium qui ont une grande section efficace d'absorption pour les neutrons thermiques.

Selon la position de ces plaques par rapport à la distribution des neutrons dans la pile, on pourra obtenir $\delta K > 0$, $\delta K = 0$ et $\delta K < 0$.

La montée en puissance se fera donc en réglant les plaques de manière à obtenir $\delta K > 0$ avec une période convenable, puis, une fois arrivé à la puissance désirée, on ramènera les plaques à une position correspondant à $\delta K = 0$.

La puissance que l'on pourra atteindre de cette manière n'est limitée que par l'efficacité du système de refroidissement de la pile et par la tenue des divers matériaux qui entrent dans sa constitution, en particulier vis-à-vis de la température.

L'arrêt du réacteur sera obtenu en introduisant dans la pile des barres dites de "sécurité" contenant du cadmium ou du

bore en quantité telle que toute réaction en chaîne est impossible en leur présence au sein du milieu réactif.

Signalons quelques valeurs numériques remarquables d'un réacteur nucléaire.

1) La puissance dégagée pour 3.10^{10} fissions/s est égale à 1 W (la puissance dégagée par les fissions spontanées est de 0,2 μ W par tonne d'uranium).

2) La formation de plutonium correspond à 1 mg de plutonium par kW de puissance et par jour.

Ces éléments de base étant donnés, il faudra équiper le réacteur d'un ensemble d'appareillages de mesure qui peuvent se répartir en deux groupes et qui font appel à des techniques très diverses (fig. 2) [24], [25], [26], [27], [28].

Mesures nucléaires	Mesures et opérations non nucléaires
Mesure de la puissance par mesure du flux de neutrons thermiques.	Servomécanismes et télécommandes pour :
Mesure de la réactivité de la pile	- plaques de réglage
Mesures de santé (rayon γ , neutrons lents, neutrons rapides, contamination des fluides).	- barres de sécurité
	- mesure des niveaux (pile à eau lourde).
	Mesures des débits et pressions du fluide de refroidissement.
	Mesure des températures.
	Mesure des calories évacuées par le fluide de refroidissement.

1ère Partie

M E S U R E S N U C L E A I R E S

- C H A P I T R E I -

MESURE DE LA PUISSANCE PAR LA MESURE DU FLUX

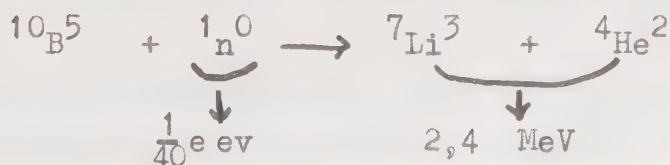
DE NEUTRONS THERMIQUES

Si, dans un réacteur, la répartition relative des densités neutroniques est connue et reste identique à elle-même, quelle que soit la puissance, ce qui est presque toujours le cas, la mesure de la puissance peut se ramener à la mesure du flux en un point quelconque. La puissance sera proportionnelle au flux de neutrons thermiques en ce point.

I - DETECTEURS DE NEUTRONS THERMIQUES [3] -

1 - Thermopiles à bore.

Ces thermopiles comportent des soudures thermoélectriques alternativement recouvertes de bore et nues. Le bore contient un isotope B^{10} (18 pour cent) qui présente une grande section efficace (3 500 barns) vis-à-vis des neutrons. Cet isotope se transmute après capture d'un neutron en une particule α et un noyau de lithium.



Une élévation de température apparaît, due à la perte d'énergie de ces particules secondaires. Il en résulte une force électromotrice sensiblement proportionnelle au flux, qui est aisément mesurable par tout système analogue à ceux usuellement uti-

lisés pour la mesure des forces électromotrices de couples thermoélectriques.

Un cylindre de bore de 1,5 mm de diamètre et 3 mm de longueur absorbe 40 mW dans un flux de 10^{12} neutrons/s/cm² et donnera donc, enrobé sur un couple unique du type chromel-alumel, une force électromagnétique de 600 μ V pour un flux de 10^{12} neutrons/s/cm². La constante de temps d'un tel détecteur peut atteindre plusieurs secondes.

2 - Chambres d'ionisation.

Plus encombrant mais plus sensible que le précédent, ce détecteur est utilisé dans presque tous les réacteurs.

La mesure des flux de neutrons thermiques, pour le contrôle des piles, au moyen de chambres d'ionisation, exige la production de réactions intermédiaires au cours desquelles sont émises des particules ionisantes. Il faut donc disposer d'éléments réagissant aux neutrons soit par une réaction de transmutation, émettant une particule α par exemple, soit par une fission.

Ces éléments sont essentiellement : ^{10}B , ^{235}U , ^{239}Pu .

^{10}B donne lieu à une réaction de transmutation $^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$ qui émet des particules α de 1,64 MeV et des noyaux de recul ^7Li de 0,93 MeV.

^{235}U et ^{239}Pu donnent lieu à une fission émettant des fragments d'énergie totale égale à 150 MeV environ.

Ces matériaux réagissant aux neutrons doivent être introduits dans la chambre d'ionisation et il est important d'envisager sous quelle forme ils le seront.

Formes d'utilisation des matériaux.

1°) ^{10}B est essentiellement utilisé sous les formes suivantes :

- BF_3 : gaz que l'on injecte à l'intérieur de la chambre.
- B^4C : solide que l'on dépose sur les électrodes.

Il faut noter que l'on utilise généralement le bore naturel qui ne contient que 18 pour cent de l'isotope ^{10}B .

2°) Des composés de ^{235}U peuvent également être utilisés :

- U_3O_8 (solide) que l'on dépose sur les électrodes.
- UF_6 (gaz) que l'on injecte dans la chambre.

3°) ^{239}Pu sous forme métallique.

Nous avons groupé ces diverses possibilités dans le tableau suivant (page 12).

A la suite de ces considérations et en tenant compte de nos disponibilités, nous avons été amené, en collaboration avec MM. LALLEMANT et LABEYRIE, à établir un modèle de chambre à dépôt de bore utilisée actuellement à la pile de Saclay. Cette chambre fournit un courant de l'ordre de 10^{-14} A pour un flux de un neutron par seconde et par centimètre carré. Placée dans le protecteur de béton d'une pile, elle est soumise à des flux variant entre 1 et 10^8 neutrons/s/cm², d'où des courants d'ionisation variant de 10^{-14} à 10^{-6} A (fig. 3) [5].

Description de la chambre.

La chambre est essentiellement constituée par trois plateaux d'aluminium de 10 cm de diamètre, dont chacun porte sur les deux faces un dépôt de carbure de bore lié par du silicate de sodium. La surface de chacun de ces dépôts est de $76 \pm 0,5$ cm² et

TABLEAU RECAPITULATIF

Processus utilisé	Type	Nature	Inconvénients	Avantages
Chambres à désinté- gration	BF_3	Chambres à gaz	Délicate de cons- truction. Très sensible aux γ . Compensation aux γ difficile.	Bonne sensibi- lité aux neu- trons (accrue par emploi de $^{10}\text{BF}_3$).
	B_4C	à plateaux	Sensibilité moyenne aux neutrons. Absorbent beau- coup de neutrons	Construction facile. Faible sensibilité aux γ . Compensation assez aisée aux γ (accrue par emploi de $^{10}\text{B}_4\text{C}$)
Chambres à fission	$^{235}\text{UF}_6$	Chambre	Sensible aux γ . Compensation délicate.	Très sensible aux neutrons.
	^{235}U	Chambre "spirale"	Coûteuse (U_{235} produit rare).	Insensible aux γ . Très sensible aux neutrons.
	^{239}Pu	Chambre "spirale"	Coûteuse (Pu produit rare). Emission α très importante.	Insensible aux γ . Très sensible aux neutrons.

leur épaisseur moyenne est égale à $2,7 \pm 0,1$ mg/cm². Chacun de ces dépôts absorbe 6 à 10 pour cent du flux de neutrons thermiques qui le traverse. Les trois plateaux fixés à une même tige d'aluminium constituent l'électrode collectrice de la chambre. Cette électrode est reliée à la grille d'entrée du préamplificateur qui sera décrit plus loin. Le passage isolé du support de l'électrode collectrice à travers la paroi de la chambre est assuré par une porcelaine vitrifiée, servant également de support mécanique.

L'électrode haute-tension est constituée par six coupelles en aluminium, soudées de telle sorte que chacun des trois disques porte-dépôt est entouré presque complètement par deux de ces coupelles.

L'électrode haute-tension est tenue d'une façon rigide par trois colonnes, fixées elles-mêmes à la paroi extérieure de la chambre par des porcelaines vitrifiées, identiques à celle qui supporte l'électrode collectrice. La paroi de la chambre est en acier. Les porcelaines sont soudées d'une façon étanche sur cette paroi.

Les dimensions de la chambre sont données sur la figure 4.

La paroi en forme de cloche de la chambre est soudée à l'extérieur sur la plaque qui porte les passages après la soudure de ceux-ci.

Une fois montée, la chambre est vidée et remplie d'air sous une pression de 76 cm Hg.

Courant obtenu en fonction de la tension entre les électrodes.

Avec une source de rayons γ de 1 millicurie, le courant de saturation est atteint à 1 pour cent près pour une tension inférieure à 10 V (à 1,5 V, la saturation est déjà atteinte à 10 pour cent

près).

Avec une source de neutrons thermiques, il faut une tension supérieure à 50 V pour atteindre la saturation à 1 pour cent près.

Rendement.

a) Pour les rayons γ : 1 millicurie de radium filtré par 1 mm de cuivre et placé en A (fig.4) produit un courant de $1,5 \cdot 10^{-11}$ A.

b) Pour les neutrons thermiques : le rendement de la chambre a été déterminé en la plaçant à la sortie d'un canal tangentiel de la pile ZOE et en comparant le courant que donne alors cette chambre à celui que donne dans les mêmes conditions une chambre d'ionisation spéciale, à un seul dépôt de B_4C (d'épaisseur égale au double du parcours des rayons α) et à paroi mince en aluminium. Le rendement de cette chambre spéciale a été déterminé par ailleurs, en la plaçant dans un flux de neutrons thermiques étalonné au moyen d'un détecteur au manganèse de faible épaisseur : on trouve que 1 cm^2 du dépôt "moyen" de B_4C donne un courant de $3,1 \cdot 10^{-17}$ A lorsqu'il est placé dans un flux de 1 neutron/cm²/s.

En fin de compte, le rendement de la chambre à six dépôts est donné par l'expression

$$I = 1,1 (\pm 0,2) \cdot 10^{-14} F$$

F étant le flux de neutrons traversant la chambre (exprimé en neutrons par centimètre carré et par seconde) et I étant le courant débité par la chambre (exprimé en ampères).

Remarque : à titre de comparaison, une chambre remplie de trifluorure de bore (BF_3) sous une pression de 76 cm Hg, et quia même volume intérieur que la chambre à dépôts solides, donne dans les mêmes conditions un courant

$$I(\text{BF}_3) = 26.10^{-14} \text{ F.}$$

On voit qu'à volume égal les chambres à dépôts solides sont environ 20 fois moins sensibles que les chambres remplies de BF_3 .

Sensibilité.

La sensibilité de la chambre est limitée par la résistance de mesure R (fig.7). La valeur de cette résistance ne peut, en pratique, dépasser $10^{12} \Omega$ en raison de l'instabilité et de la polarisation spontanée des résistances de valeur plus élevée.

Le courant le plus faible que l'on puisse mesurer ainsi à l'aide de l'amplificateur à courant continu, décrit plus loin, avec une précision de l'ordre de 5 pour cent, est 10^{-14} A , ce qui correspond à un flux minimum mesurable d'environ 1 neutron thermique par seconde et par centimètre carré.

Proportionnalité du courant débité et du flux de neutrons.

La linéarité de la variation du courant en fonction de celle du flux de neutrons a été vérifiée en plaçant la chambre dans un canal de contrôle de ZOE.

On a constaté que le courant reste proportionnel au flux de neutrons jusqu'à des flux de 3.10^8 neutrons/cm² par seconde (courant de 4 μA environ) pour une différence de potentiel entre électrodes de 250 V.

Influence de l'épaisseur du dépôt de B_4C sur le rendement.

L'énergie des particules α et des noyaux de lithium issue de la réaction $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$ est relativement faible, 1,64 MeV et 0,93 MeV respectivement. Ces particules ont des parcours de 3,8 μ et de 1 μ environ dans le dépôt de B_4C (densités superficielles

correspondantes : 1 mg/cm^2 et $0,25 \text{ mg/cm}^2$, et des parcours de l'ordre de 7 mm et de 1,8 mm, respectivement, dans l'air à pression normale.

Avec le procédé d'obtention des dépôts décrits plus haut, il est pratiquement impossible, à cause de la taille des grains de B_4C , de descendre au-dessous de l'épaisseur correspondant au parcours maximum des rayons α dans le dépôt.

Pour des épaisseurs supérieures, on observe expérimentalement, lorsque l'épaisseur croît, une lente décroissance du rendement due à l'absorption des neutrons dans le dépôt.

Evolution du dépôt de B_4C .

Les dépôts de B_4C sur aluminium conservent une bonne adhérence. Cependant, une évolution du dépôt (en particulier du silicate de sodium servant de liant) était à craindre sous l'influence du bombardement des neutrons et surtout des rayons α et de lithium prenant naissance dans la réaction $^{10}\text{B} (n, \alpha) ^7\text{Li}$. On a donc soumis des plaques d'aluminium recouvertes du dépôt de B_4C à un flux de neutrons très intense en les plaçant dans la région centrale de ZOR. La dose totale reçue a été de $7 \cdot 10^{15}$ neutrons/ cm^2 à un flux moyen de $3 \cdot 10^9$ neutrons/ cm^2/s . Ce flux correspond à la production d'un courant d'ionisation de $0,1 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$ de dépôt. Cette dose de neutrons est celle que recevraient en 30 ans des chambres d'ionisation de contrôle situées à leur emplacement normal dans une pile atomique marchant constamment à une puissance de 2.000 kW.

Après cette irradiation massive, il n'a été constaté aucun changement dans l'aspect et l'adhérence du dépôt.

Activité du dépôt après irradiation.

L'activité β et γ à longue période du dépôt de B_4C irradié

est très faible ; elle décroît suivant une période de 3 h environ due au manganèse présent à l'état d'impureté dans le B_4C et dans l'aluminium supportant le dépôt.

A cette activité se superpose une activité de plus grande période, due au cuivre, présent également à l'état d'impureté. Ces activités parasites du dépôt ne sont pas gênantes car elles ne sont guère plus importantes que celles de l'aluminium constituant les parois de la chambre et qui produisent un courant d'ionisation négligeable devant celui qui est dû à la réaction $B(n,\alpha)Li$.

3 - Chambre d'ionisation de démarrage.

Dans le cas d'une pile n'ayant encore jamais fonctionné, la puissance initiale de la pile est très faible, étant due uniquement aux fissions spontanées, soit $0,2 \mu W$ par tonne, ou encore de l'ordre de $0,5$ à $0,8 \mu W$ pour une pile à eau lourde par exemple, et de 2 à $8 \mu W$ pour une pile au graphite. Afin de déterminer avec sûreté le niveau critique où la réaction en chaîne peut s'amorcer, il est indispensable de pouvoir constater tout accroissement, même faible, de la puissance initiale.

On dispose dans ce but, à l'occasion du premier démarrage d'une pile, une série de détecteurs au voisinage immédiat du milieu multiplicateur (généralement dans les canaux d'irradiation). Les détecteurs employés seront du type compteurs à BF_3 suivis d'un dispositif de comptage, et de chambres à neutrons lents suivies d'une amplification à courant continu.

Nous avons établi deux modèles de chambres de démarrage, l'un à BF_3 (fig.11) et l'autre à B_4C (fig.12), dont la caractéristique essentielle par rapport aux chambres de contrôle décrites précédemment est leur faible volume qui permet de les introduire dans les canaux expérimentaux de la pile.

Etalonnage expérimental des chambres à démarrage à neutrons lents.

Chambres étudiées :

- 1 chambre à BF_3 (1 litre)
- 2 chambres à B_4C (surface B_4C 100 cm^2)
- 1 chambre gamma à air.

Etalonnage des chambres à neutrons.

L'expérience réalisée a permis de déterminer

- 1°) le facteur de perturbation des chambres,
- 2°) la courbe de réponse du courant d'ionisation en fonction du flux de neutrons.

1) - Une première chambre à B_4C munie d'un détecteur placé à 5 mm du dépôt de B_4C (détecteur au manganèse) a été placée dans le canal tangentiel de la pile de Châtillon durant un temps déterminé, la même expérience a été reprise avec le détecteur seul placé au même endroit, la puissance de la pile étant maintenue constante durant ces deux manipulations.

Le rapport des activités du détecteur après irradiation dans ces deux conditions a été trouvé égal à 0,75.

Ce rapport est sensiblement le même pour une chambre à BF_3 .

2) - La même chambre a été placée dans un flux plus faible avec 2 détecteurs de part et d'autre de la chambre à la sortie d'un canal de la pile de Châtillon.

Nous avons ainsi pu obtenir un point de la courbe de réponse, c'est-à-dire le courant de la chambre en fonction du flux de neutrons mesuré (10^6 neutrons/s/cm² $\pm$ 10 pour cent).

Etalonnage en puissance des chambres de démarrage en fonction de leur emplacement sur P2.

Les chambres d'ionisation sont toutes placées contre la cuve en position tangentielle pour les chambres à B_4C et radiale pour la chambre à BF_3 . Dans ces conditions, nous connaissons la valeur calculée du flux pour une puissance de 1 mW,

$$1 \text{ mW} \longrightarrow 1338 \text{ n/s/cm}^2 \quad [9]$$

Les résultats obtenus (compte tenu du facteur de perturbation) sont condensés dans le tableau suivant (voir page 20).

4 - Simplification de la construction des chambres d'ionisation par utilisation d'une pile électrode.

Une chambre d'ionisation (fig. 13) est généralement constituée de deux électrodes, l'une interne, l'autre externe, entre lesquelles on réalise une différence de potentiel. L'électrode interne dite "collectrice" doit, pour les besoins de la mesure par méthodes électrométriques, être bien isolée par rapport à la masse (isolement supérieur à $10^{14} \Omega$ dans le plus grand nombre de cas). De ce fait, la présence d'une différence de potentiel importante V entre les deux électrodes peut amener des perturbations dans les mesures, en particulier par la présence du courant de fuite $i_f = \frac{V}{r_f}$ où r_f est la résistance d'isolement entre les deux électrodes.

Si V est de 200 V et r_f de $10^{14} \Omega$, le courant de fuite est donc de $2 \cdot 10^{-12}$ A, valeur très souvent bien supérieure à celle du courant d'ionisation i que l'on se propose de mesurer.

On remédie à cet inconvénient par l'utilisation d'un anneau de garde qui ramène la tension à laquelle est soumis l'isolant de l'électrode collectrice à une valeur bien inférieure et en fait

CHAMBRES DE DEMARRAGE (étalonnées en puissance pour la pile P2)

Type de la chambre	Sensibilité en ampères par $n/s/cm^2$	Emplacement	Résistance de charge	Domaine de mesure	Linéarités dans ce domaine	Puissance pour déviation totale de l'échelle sur les sensibilités			Déclenchement pour le démarrage
						0,1 V	1 V	10 V	
BF ₃ 1 litre dite : 2P	$2,92 \cdot 10^{-14}$ A	Radial, Centre cuve dans le canal S ₆ (Pile de Saclay)	$10^{12} \Omega$	2,5 à 250 μ W	totale	2,5 μ W	25 μ W	250 μ W	néant
BF ₃ 100 cm ² dite : 1P	$2,92 \cdot 10^{-16}$ A	Tangentiel, Contre cuve dans le canal S ₄	$10^{12} \Omega$	250 μ W à 25 mW	totale	250 μ W	2,5 mW	25 mW	néant
BF ₃ 100 cm ² dite : 3P	$2,92 \cdot 10^{-16}$ A	Tangentiel, Contre cuve dans le canal N ₁₀	$10^{10} \Omega$	25 mW à 2,5 W	totale	25 mW	250 mW	2,5 W	à volonté sur chacune des sensibilités. Permanent sur 2,5 W
Chambre Y volume 100 cm ³ dite : expérimentale	négligeable	dans le canal N ₄	$10^{12} \Omega$	0,1 R/3 h à 10 R/3 h	totale	0,1 R/3 h	1 R/3 h	10 R/3 h	néant

égale à R_i (R est ici la résistance de charge de l'électromètre ou de la lampe électromètre). Le courant de fuite n'est plus que de $\frac{R_i}{r_f}$, soit $\frac{1}{100}$ dans le cas où $R = 10^{12} \Omega$ (valeur la plus élevée utilisée couramment) et r_f étant toujours de $10^{14} \Omega$ (fig. 14).

Par ailleurs, pour la commodité des manipulations, on est souvent amené à entourer l'électrode externe d'une enceinte protectrice mise à la masse. Ce dispositif, qui donne toute satisfaction (fig. 15), présente cependant les inconvénients suivants :

a) difficulté de la réalisation d'un passage double à anneau de garde étanche au vide et à la pression, modèle de passage ne se trouvant pas dans l'industrie ;

b) utilisation de deux enveloppes successives pour la chambre, montage particulièrement contre-indiqué dans l'étude des rayonnements de faible énergie.

Nous donnons ici une solution permettant une construction plus simple et plus robuste de la chambre, et qui, tout en gardant les avantages du montage à anneau de garde, n'a aucun de ses inconvénients.

Pile électrode (fig. 16)

L'électrode centrale contient une pile du type Zamboni [10], montée de manière à porter cette électrode à la haute tension par rapport à la masse (fig. 17). Ces piles de grande résistance interne peuvent cependant facilement débiter des courants de l'ordre de grandeur des courants d'ionisation (jusqu'à 10^{-7} A). La chute de tension, toujours très faible, n'a pour effet que de déplacer le point de fonctionnement de la chambre sur sa courbe de saturation et ne perturbe en rien la mesure (fig. 18). L'anneau de garde est supprimé sans que l'isolant I soit soumis à une différence de potentiel supérieure à R_i et l'électrode externe est

à la masse, d'où l'absence d'une seconde enceinte de protection. Ce montage simplifie considérablement la construction des chambres d'ionisation.

Signalons, en particulier, qu'il permet de réaliser des chambres d'ionisation avec des passages isolants industriels, en particulier les passages du type céramique soudable utilisés dans la technique des condensateurs étanches.

I - MESURE DES COURANTS CONTINUS FAIBLES -

Toutes les chambres d'ionisation décrites fournissant des courants continus dont les ordres de grandeur varient usuellement entre 10^{-6} et 10^{-15} A, nous avons été amené à étudier et à réaliser une série d'appareillages susceptibles de permettre la mesure de ces faibles courants.

1 - Le galvanomètre.

Souvent utilisé, cet appareil peut, sous une forme industrielle, avoir une sensibilité de 10^{-8} A pour toute l'échelle. Cette sensibilité est insuffisante dans de nombreux cas et, de plus, le galvanomètre ne se prête guère à un enregistrement instantanément utilisable. Les enregistreurs de courant ayant la sensibilité la plus poussée semblent être les potentiomètres électroniques à vibreurs, qui peuvent atteindre 10^{-6} A pour toute l'échelle. De ce fait, leur utilisation est très limitée (fig. 5).

2 - L'électromètre.

La chambre d'ionisation peut être équipée d'un passage à grand isolement ; il sera possible, dans ces conditions, de faire passer le courant d'ionisation à travers une résistance de très grande valeur. C'est ainsi qu'avec une résistance de $10^{12} \Omega$ on obtiendra une différence de potentiel de 1 V pour un courant de

10^{-12} A. Les électromètres donnant une déviation appréciable pour une telle tension sont des appareils peu industriels. L'électromètre, qui se prête très mal à l'enregistrement direct et aux télémessures, n'est guère utilisé dans les installations de contrôle des réacteurs.

3 - L'amplificateur à courant continu et la lampe électromètre [6] .

C'est le procédé le plus couramment utilisé. La chambre d'ionisation, munie de passages à très grand isolement, est suivie d'un préamplificateur à lampe électromètre. La tension produite par le passage du courant à travers une grande résistance est appliquée à la grille de commande du tube électromètre. Ce dernier est relié par un câble, dont la longueur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres, à un amplificateur à courant continu. Cet amplificateur est employé souvent avec une contre-réaction qui peut être totale, d'où une grande stabilité de gain (fig. 6).

Nous décrivons ici un tel amplificateur dont l'emploi simplifie le choix des passages isolants utilisés dans la chambre. On sait, en effet, que la contre-réaction totale consiste à opposer à la tension e_c que l'on veut mesurer la totalité de la tension de sortie de l'amplificateur. Dans ces conditions, A étant le gain de l'amplificateur sans contre-réaction, la tension de sortie est

$$e_s = (e_c - e_s) A, \text{ d'où } e_c = \frac{e_s A}{A + 1}$$

valeur très sensiblement égal à e_c , car A est grand.

Si I_c est le courant fourni par la chambre d'ionisation,

I_R le courant traversant la résistance R ,

I_r le courant de fuite traversant la résistance r

équivalente à l'ensemble des résistances parasites

(résistance superficielle de la lampe électromètre, etc...)

on a

$$I_c = I_R + I_r.$$

L'amplificateur mesure la tension $e_c = RI_R$.

Le courant I_r , non mesuré par l'amplificateur, constitue l'erreur commise sur la mesure de I_c .

On voit que, dans le cas du montage à contre-réaction représenté sur la figure 7, le courant de fuite est

$$I_r = \frac{e_c - e_s}{r} = \frac{e_s}{Ar} = \frac{e_c}{Ar}$$

Il serait $I_r = \frac{e_c}{r}$ dans un montage sans contre-réaction.

Par l'emploi de la contre-réaction, on a donc divisé par A le courant I_r , donc l'erreur commise sur la mesure de I_c .

Si le gain de l'amplificateur employé (fig. 6) est $A = 4\ 000$, nous remarquerons que l'emploi d'une résistance de mesure de R et de $10^{12} \Omega$ nécessite, pour une mesure de I_c avec une précision meilleure que 1 pour cent, une résistance parasite r supérieure à $10^{14} \Omega$, s'il n'y a pas de contre-réaction, et seulement à $2,5 \cdot 10^{10} \Omega$ dans le montage à contre-réaction totale, ce qui permet l'emploi d'un isolant ordinaire comme la stéatite pour le passage de l'électrode centrale de la chambre.

Outre la lampe électromètre et la résistance R de mesure, le préamplificateur contient un relais qui permet de court-circuiter à distance R et de réaliser ainsi le "zéro" de l'amplificateur. Ce relais comporte :

a) un blindage magnétique supprimant les fuites magnétiques

qui perturbent le fonctionnement de la lampe électromètre ;

b) des contacts argent sur argent diminuant considérablement la différence de potentiel de contact.

Ces deux dispositions sont nécessaires pour éviter tout "faux zéro" de l'amplificateur.

Ce dernier comprend essentiellement une alimentation 230 V très soigneusement stabilisée (une variation inférieure à 10 mV de la tension totale pour une variation de ± 10 V de la tension secteur), et un amplificateur à trois étages. La sortie de l'amplificateur alimente soit un appareil de mesure, soit un relais ou encore un enregistreur dont la résistance d'entrée est de quelques centaines d'ohms.

Le gain total de l'ensemble préamplificateur-amplificateur (fig. 6), en fait de la contre-réaction totale, est égal à l'unité. Le gain en courant est donné par le rapport de la résistance R à la résistance de sortie de l'amplificateur. Dans le cas où celles-ci sont respectivement 10^{12} et $10^{13} \Omega$, le gain est de 10^9 .

En permettant la résistance série de l'appareil de sortie, on peut obtenir les trois sensibilités suivantes : 0,1 , 1 et 10 V pour toute l'échelle.

La dérive de zéro de cet amplificateur est de l'ordre de quelques mV/24 h.

La stabilité de gain et la faible dérive du zéro de cet amplificateur ont permis de lui adjoindre un système d'affichage à corset étendu permettant une précision de lecture de l'ordre de $\frac{1}{1000}$ de la puissance maximum de réacteur.

4 - Electromètre à condensateur vibrant (fig. 8)

L'électromètre à condensateur vibrant constitue un système moderne de mesure des courants faibles dans des conditions électrométriques.

Principe.

Le courant continu à mesurer est amené à traverser une résistance étalon R_e de grande valeur (10^{11} à $10^{12} \Omega$) et la tension développée aux bornes est appliquée par l'intermédiaire d'une résistance de découplage R_d à un condensateur dont une armature est maintenue en vibration au moyen d'une bobine d'entretien alimentée par une source auxiliaire.

Si la constante de temps $C_v R_d$ est $\gg \tau$, période de vibration du condensateur, il apparaît aux bornes de celui-ci une composante alternative proportionnelle à la tension continue appliquée. Cette tension alternative peut dès lors être amplifiée sans difficulté au moyen d'un amplificateur ordinaire à courant alternatif.

Les mesures sont effectuées par une méthode de zéro afin de les rendre indépendantes de l'amplitude de vibration du condensateur.

A cet effet, le signal alternatif fourni par le condensateur vibrant et convenablement amplifié alimente un des enroulements d'un petit moteur diphasé dont l'autre enroulement est branché directement sur la source auxiliaire alimentant également la bobine d'entretien du condensateur vibrant. Ces deux signaux sont réglés de manière à avoir une différence de phase de 90° l'un par rapport à l'autre. Cette différence sera positive ou négative selon le sens de la tension continue d'entrée appliquée

au condensateur vibrant. On obtient ainsi une rotation du moteur dont le sens varie selon le signe de la tension. Le moteur entraîne un potentiomètre alimenté par une pile de grande capacité et délivrant une tension mise en opposition avec la tension d'entrée.

Par suite de cette disposition, le moteur tourne jusqu'à ce que la tension fournie par le potentiomètre soit égale à la tension à mesurer ; lorsque l'opposition est parfaite, le signal fourni par le condensateur vibrant devient nul et le moteur s'arrête. La valeur de la tension continue correspondante se trouve définie avec une grande précision, la mesure étant rendue totalement indépendante de l'amplitude de vibration du condensateur.

Modèle réalisé au C.E.A.

Performances normales	en tension	en courant
Sensibilité	100 mV pour toute l'échelle	10^{-13} A pour toute l'échelle avec une résistance étalon de $10^{12} \Omega$
Précision	$\pm 0,3$ mV	$\pm 0,3 \cdot 10^{-15}$ A
Sensibilité de puissance	10^{-19} W	10^{-19} W
Dérive en 24 h	200 à 300 μ W maximum	2 à $3 \cdot 10^{-16}$ A

En soignant particulièrement la précision d'ajustage du condensateur vibrant, il est possible d'obtenir une sensibilité en tension de 10 mV pour toute l'échelle avec une précision de l'ordre de 1 pour cent, soit une sensibilité en puissance de 10^{-20} W.

5 - Résistances de haute-valeur [11] .

Les résistances de haute-valeur sont utilisées comme résistances de fuites dans les montages à lampe électromètre ou à condensateur vibrant, comme base de mesure des courants continus faibles produits dans les chambres d'ionisation. D'une manière générale, elles constituent un élément essentiel pour toutes les mesures des rayonnements. De ce fait, la précision des mesures de rayonnements est **affectée** de l'erreur même qui est liée à la valeur mesurée de la résistance.

Nous avons réalisé un type de résistance dont les valeurs s'échelonnent entre $10^7 \Omega$ et $10^{13} \Omega$. Ces résistances sont précises et de haute stabilité. Les effets de différents facteurs physiques, tels que la tension appliquée aux bornes et la température, susceptibles de modifier la valeur de ces résistances, sont indiqués.

Principe.

On utilise une substance colloïdale, dans laquelle on disperse des particules très conductrices. La condition indispensable est que la substance colloïdale pure, sans adjonction de particules très conductrices, ait une résistivité supérieure à la plus forte valeur de résistance que l'on désire obtenir. Pour se placer dans les conditions les plus favorables, il faut :

1°) que les particules très conductrices soient réunies en grains aussi petits que possible ;

2°) que la taille des grains soit aussi régulière que possible ;

3°) que, dans les conditions d'utilisation, les agrégats

de particules soient stables physicochimiquement ;

4°) que la dispersion au sein du colloïde soit aussi homogène que possible, c'est-à-dire que la distance entre les grains conducteurs soit constante.

Remarque.

La résistivité électrique d'un tel système étant fonction de la distance entre les grains, il est évident que cette dernière devra, pour ne pas être affectée par de faibles dilatations dues aux variations de température, être aussi grande que possible.

Par exemple, l'emploi d'une matière plastique extrêmement isolante, comme le polystyrène, chargée de grains conducteurs ne conviendrait pas pour les valeurs de résistances indiquées plus haut. Il faudrait pour cela rapprocher les grains de telle manière qu'ils soient presque en contact et une faible variation de la distance entraînerait une énorme variation de la résistivité .

Substances utilisées.

La substance colloïdale utilisée pour la constitution de ces résistances est la gélatine, qui permet d'obtenir des suspensions fines et homogènes. A chaud, on peut l'appliquer facilement en couches minces et uniformes.

Pour se placer dans les conditions les plus favorables et satisfaire aux quatre points énumérés plus haut, il est intéressant d'utiliser les particules très conductrices sous forme colloïdale. On ne peut, dans ce cas, utiliser que les métaux nobles ou le carbone. La condition fondamentale est que les deux colloïdes mis en présence ne flocculent pas. Nous avons utilisé une suspension stable de carbone colloïdal qui remplit cette dernière condition : l'encre de chine.

Fort heureusement, la gélatine chauffée en présence d'encre de chine ne cultive pas. Il faut donc réaliser la diffusion du carbone colloïdal aussitôt que le sol de gélatine est obtenu. L'opération doit se faire à chaud pour diminuer la viscosité du sol et en agitant, mais en évitant autant que possible d'incorporer des bulles gazeuses dans la suspension et de former une mousse superficielle. Dans tous les cas, il faut chauffer le sol de gélatine en-dessous du point d'ébullition.

Description de la résistance.

La résistance (fig. 19) se présente sous forme d'un cylindre de verre, sur lequel a été déposée une couche de la suspension décrite précédemment et maintenu sous vide dans une ampoule du même verre (les dimensions extérieures des résistances sont de 30 mm de long et 4 mm de diamètre). Le verre cristal donne d'excellents résultats quand sa surface est protégée par un film de vernis silicone. Il a de plus l'avantage de se souder au copperclad, permettant ainsi la confection de passages très étanches de bornes soudables à l'étain.

Fabrication de la résistance.

La couche organique est déposée à chaud sur le cylindre de verre. Il est nécessaire d'effectuer un premier séchage de cette couche sous lampe à infra-rouge avant de peindre les bornes avec du graphite colloïdal en suspension dans l'alcool. Ce dernier sèche instantanément et aucune diffusion de graphite dans la couche n'est à craindre.

Stabilisation de la couche organique.

La couche organique est stabilisée par un séchage parfait et un dégazage prolongé effectué sous vide et sous la lampe à infra-rouge. L'opération étant terminée, on scelle la résistance

sous vide dans son ampoule de verre.

Après un vieillissement de quelques mois, la couche organique possède un haut degré de stabilité et la résistance atteint sa valeur définitive.

Coefficient de température.

Expérimentalement, on s'aperçoit que le coefficient de température est causé par les gaz absorbés dans la couche organique. Par un dégazage judicieux de la couche sous les rayons infra-rouges, on diminue considérablement la valeur de ce coefficient. On obtient facilement des valeurs de l'ordre de $-0,1$ pour cent par degré C. Dans certains cas, nous avons obtenu des coefficients positifs. Cela veut dire que les gaz inclus dans la couche n'ont plus qu'une très faible action sur le coefficient. La dilatation de la gélatine qui donne un coefficient positif a un effet antagoniste plus fort. En effet, les micelles conductrices de carbone s'éloignent les unes des autres et la résistance augmente. En jouant sur la somme algébrique des deux effets, il est pratiquement possible d'obtenir des coefficients négligeables.

Coefficient de tension (en courant continu).

Le coefficient de tension est fonction des points suivants :

- a) longueur de la couche organique résistante ;
- b) gaz subsistant dans l'ampoule vidée ;
- c) distance entre les micelles de carbone.

Nous avons obtenu facilement des coefficients de tension inférieurs à $-0,2$ pour cent par volt.

Stabilité.

Les résistances réalisées, mesurées dans des conditions

de température et de tension appliquée précises, ont une stabilité $\pm 0,5$ pour cent après un vieillissement de quelques mois.

Polarisation.

Elle est très faible et négligeable dans la plupart des applications. Mesurées successivement par le passage d'un courant connu dans un sens puis dans l'autre, les résistances réalisées n'ont présenté aucune différence de valeur dans des conditions de mesure où la précision atteignait 0,5 pour cent.

6 - Mesure de précision des résistances très élevées par l'emploi d'un courant étalon [12] .

La mesure des résistances de haute valeur se fait habituellement par des systèmes en pont de Wheatstone, comportant une branche à haute impédance constituée soit par un électromètre, soit par un amplificateur à lampe électromètre. Ces dispositifs font appel à l'emploi de résistances "étalons" de comparaison qui sont elles-mêmes de l'ordre de grandeur de la résistance à mesurer.

Signalons qu'une longue expérience prouve que les valeurs indiquées par les constructeurs sont très souvent erronées (l'erreur est souvent de l'ordre de 20 pour cent). Ces résistances évoluent en effet dans le temps et n'atteignent une relative stabilité qu'au bout de quelques mois.

Par ailleurs, ces résistances qui présentent, du fait de leur composition semi-conductrice, des coefficients de tension et de température très élevés, sont rarement utilisées dans les conditions exactes de tension et de température où elles ont été mesurées par le constructeur. Ces différentes causes sont à l'origine du fait que les mégohmmètres vendus dans le commerce ne permettent pas des mesures à mieux que 10 pour cent.

Nous avons conçu un dispositif qui permet de mesurer les résistances avec une précision meilleure que 0,5 pour cent et qui permet de placer la résistance à mesurer dans les conditions mêmes de son emploi, c'est-à-dire comme résistance de fuite d'une lampe électromètre. La tension aux bornes de la résistance reste toujours inférieure à 50 V ; par ailleurs, les conditions de température peuvent être imposées et mesurées en même temps que la résistance.

Nous avons donc réalisé dans ce but une petite chambre d'ionisation fournissant un courant parfaitement constant et déterminé avec précision.

Chambre d'ionisation à courant étalon.

Cette chambre d'ionisation (fig. 20) est une chambre à gaz de 100 cm³ de volume, contenant du CO₂ dont le carbone est le carbone 14 radioactif β (β d'énergie maximum 140 keV) et de période 5 000 ans environ.

L'électrode centrale de la chambre est creuse et contient une pile du type Zamboni [10] qui donne la tension de collection des ions et dont la valeur est de 150 V. Une série d'expériences a montré que la saturation était amplement atteinte pour cette valeur de la tension.

Le remplissage de la chambre se fait **sur** un banc de pompage ; après avoir fait un bon vide et un dégazage des parois de la chambre, on y introduit du CO₂ radioactif tout en mesurant le courant d'ionisation fourni par la chambre. Une fois la valeur convenable atteinte, la chambre est soigneusement scellée et détachée du banc de pompage. Une quantité de CO₂ correspondant à 8 μ curies environ a été introduite dans la chambre que nous avons réalisée et qui fournit dans ces conditions un courant de $2,56 \cdot 10^{-11}$ A.

Mesure du courant d'ionisation.

Cette mesure doit être faite avec le maximum de précision. Nous l'avons réalisée de la manière suivante : des capacités très soigneusement isolées sont utilisées dans les conditions du montage de la figure 21. Ces capacités ont été mesurées à l'aide d'un pont de capacité dont la précision atteignait 0,01 pour cent. Dans les conditions du montage, la capacité se charge linéairement avec le temps suivant la loi

$$i = C \frac{dV}{dt}$$

Il suffit, à l'aide d'un chronomètre, de mesurer le temps d'apparition aux bornes de la capacité d'une tension déterminée mesurée par un amplificateur de précision et un potentiomètre enregistreur. Une centaine de mesures ont été faites, qui ont permis de déterminer un courant i égal à $2,56 \cdot 10^{-11}$ A $\pm$ 0,5 pour cent.

Cette précision est amplement suffisante dans la plupart des applications des grandes résistances et dépasse de loin la précision que permettent les types courants de mégohmmètres.

L'erreur $\frac{\Delta i}{i}$ de 0,5 pour cent est déterminée en partie par les fluctuations ΔF du courant d'ionisation ; celle ΔA de l'amplificateur et celle ΔM de l'appareil de mesure. On a $\frac{\Delta i}{i} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta M}{M}$. En effet, 8 μ curies correspondent à $24 \cdot 10^4$ désintégrations par seconde, soit à une fluctuation de l'ordre de $5 \cdot 10^2$ désintégrations, soit $\frac{\Delta F}{F} = 0,2$ pour cent.

L'amplificateur de mesure est un amplificateur à courant continu à lampe électromètre (fig. 6) et à contre réaction totale décrit par ailleurs (p. 23), sa stabilité est de 100 μ V sur toutes les échelles de lectures qui couvrent les gammes de 100 mV à 50 V, l'erreur est donc au maximum de 0,1 pour cent. Par ailleurs,

la précision des mesures pour un amplificateur à contre-réaction totale est $\frac{A}{1+A}$ (p. 18), A étant le gain de l'amplificateur sans contre-réaction. Dans l'amplificateur employé ce gain étant de 4 000, la précision est de 0,025 pour cent.

On a donc $\frac{\Delta A}{A} = 0,1$ pour cent.

L'erreur principale est apportée par l'appareil de lecture lui-même. Nous avons employé un appareil de classe 0,2 pour cent.

On aura donc $\frac{\Delta i}{i} = (0,2 + 0,1 + 0,2) 10^{-2}$, l'erreur totale $\frac{\Delta i}{i}$ reste inférieure à 0,5 pour cent.

Conclusion.

La mesure des résistances se ramène donc à la mesure d'une tension, en fait à la mesure de la tension qui apparaît aux bornes de la résistance du fait du passage du courant étalon I. On aura $R = \frac{V}{I}$.

On peut constater que les lectures varient linéairement avec la résistance à mesurer et sont d'autant plus précises que V est plus grand, c'est-à-dire que la résistance à mesurer est elle-même élevée. Ces deux propriétés sont spécifiques de l'emploi pour la mesure des résistances, non d'une résistance étalon, mais d'un courant étalon. On sait que les appareils de mesure par résistance étalon comportent une graduation hyperbolique et une précision d'autant moins grande que la résistance à mesurer est elle-même plus grande.

7 - Commutateur potentiométrique pour la mesure fine de la puissance [7] .

Pour mesurer avec précision la puissance de la pile, l'u-

tilisation d'une méthode d'opposition s'impose. Nous décrivons le système que nous avons réalisé et qui permet la mesure en lecture directe de la puissance avec précision (meilleure que 1 pour mille).

Principe.

Rappelons que la puissance de la pile se manifeste généralement sous la forme d'une tension continue délivrée par un amplificateur à courant continu branché sur une chambre d'ionisation. La mesure précise de la puissance se fera donc par une méthode potentiométrique qui est ici complètement automatique. En effet, par l'opposition d'une tension connue, le spot du galvanomètre de lecture est ramené automatiquement au début de l'échelle chaque fois qu'il en atteint l'extrémité.

Le nombre des oppositions partielles est indiqué par un appareil auxiliaire dont la lecture, complétée par celle du galvanomètre, donne la valeur de la puissance mesurée.

Description. (fig.9)

Le commutateur rotatif C (type téléphonique) est monté en potentiomètre P à plots comportant n positions fixes et de résistance totale R_p .

Une source de tension stabilisée de référence de tension V est branchée aux bornes du potentiomètre P. La source de tension U

à mesurer est branchée entre le curseur du commutateur potentiométrique et l'une de ses extrémités.

Ce branchement comporte dans son circuit un relais sensible S de résistance interne R_s , un galvanomètre G de résistance interne R_g et une résistance R.

Soit R_t la somme des résistances $R + R_g + R_s$, R_p étant choisi très petit devant R_t , le relais S sera réglé pour coller avec un courant $\pm I_t$ et le galvanomètre G à zéro central sera choisi de sensibilité I_t égal à $\frac{V}{nR_t}$.

L'entraînement du commutateur, assuré par un bloc pilote, persiste pendant toute la durée du collage du relais S.

Ce relais se décollera dès que la différence entre la tension U et la tension d'opposition V sera comprise entre $\pm \frac{V}{n}$, c'est-à-dire pour un courant de $\pm I_t$.

La position N, sur laquelle le balai s'arrêtera, donnera la mesure de la tension U à $\pm \frac{V}{n}$, le galvanomètre G indiquant l'écart positif ou négatif de la tension U par rapport à $N \frac{V}{n}$.

Un relais secondaire Rcc court-circuite le galvanomètre pendant toute la durée de rotation du commutateur, ceci afin d'éviter toute surcharge inutile au galvanomètre dont le spot ou l'aiguille restera toujours à l'intérieur de l'échelle.

Le relais galvanométrique comporte un contact à maximum et un contact à minimum, réglables de préférence, afin de pouvoir faire coïncider son collage avec la déviation totale du galvanomètre ; de plus, il devra être susceptible de supporter des surcharges égales à n fois son courant de collage.

Contrairement à la technique téléphonique usuelle, le bloc pilote est constitué par un système électronique simple. En effet, conformément à la figure 9, le contact mobile du relais galvanométrique est connecté à la grille de commande d'une lampe de puissance, les deux contacts fixes étant à la masse. Dans le circuit plaque de la lampe, on a placé la bobine d'excitation du commutateur ainsi qu'une résistance d'appoint R_a destinée à limiter le débit de la lampe. Aux bornes de la résistance R_a on a placé le relais secondaire R_{cc} . Dans ces conditions, on voit d'après la figure que la lampe se trouve à son cut-off (aucun débit-plaque) en l'absence du contact du relais galvanométrique le rotatif n'est pas entraîné et le relais R_{cc} ne colle pas. Au contraire, pendant toute la durée de collage du relais galvanométrique, la grille se trouve mise à la masse, d'où apparition d'un courant plaque important entraînant la rotation du commutateur et le collage du relais R_{cc} .

Ainsi constitué, ce montage fonctionne en commutateur potentiométrique automatique, c'est-à-dire sans l'intervention d'aucune manipulation.

Application à la mesure de la puissance d'une pile atomique.

La puissance de la pile mesurée à l'aide d'une chambre

d'ionisation suivie d'un amplificateur à courant continu se manifeste à la sortie de l'amplificateur, dans le cas qui nous intéresse, par une tension continue pouvant varier, par exemple, de 0 à 10 V et proportionnelle à la puissance de la pile, celle-ci pouvant varier entre 0 et 2 000 kW (pile de Saclay) (fig. 9 bis).

L'impédance de sortie de l'amplificateur est de $1\ 000\ \Omega$, avec $I_t = 5\ \mu\text{A}$ et $V = 10\ \text{V}$, la valeur de R_t a été choisie de $99\ 000\ \Omega$. La résistance totale du potentiomètre étant de $100\ \Omega$, l'erreur maximum commise, si l'on néglige la fraction (variable) de la résistance du potentiomètre qui se trouve être dans le circuit de mesure, sera donc de 2 pour mille, chiffre inférieur à toute appréciation possible sur le galvanomètre. Les valeurs adoptées pour les différents facteurs intervenant dans le montage sont résumées dans le tableau suivant :

n	R_t	R_S	R_g	I_t	R	V
20	99	3 500	50	$\pm 5\ \mu\text{A}$	95,5	10 V

Lampe : type R 120 (2 en parallèle).

Commutateur rotatif : 4 bancs - 25 positions (dont 20 utiles).

La totalité de l'échelle du galvanomètre G, à zéro central, représente donc 1 V ($\pm$ 500 mV correspondant à une puissance de la pile de $\pm$ 100 kW). Ceci permet d'apprécier une tension de sortie de l'amplificateur avec une erreur absolue de lecture inférieure à 1 kW. Il sera donc possible de mesurer en principe dans le cas extrême 2 000 kW, puissance nominale, à moins de 1 kW près, soit avec une précision meilleure que 0,5 pour 1 000.

Dispositions particulières.

Le commutateur rotatif ne pouvant, de par sa construction, tourner que dans un seul sens, il a paru préférable d'utiliser 2 bancs qui explorent le potentiomètre l'un dans le sens des potentiels croissants (0 à 10 V), l'autre dans le sens des potentiels décroissants (10 à 0 V). Ceci permet le "pas à pas" du commutateur, que la pile atomique varie dans un sens ou dans l'autre, le commutateur se plaçant automatiquement sur le banc correspondant. A défaut de cette précaution, le relais galvanométrique subirait des surcharges répétées et il y aurait augmentation du temps mort dans la lecture due à la rotation du commutateur à chaque changement de palier.

Les contacts placés sur d'autres bancs du commutateur sont utilisés pour la signalisation lumineuse à l'aide de relais intermédiaires, donnant la position du commutateur et permettant la lecture à distance de la puissance par multiples de 100 kW.

La source de référence V sert de tension de comparaison

pour la mesure et doit donc être parfaitement stable. Elle a été conçue de la façon suivante : un transformateur à fer saturé est alimenté sous 18 V, le courant du primaire est stabilisé par deux lampes fer-hydrogène en série. La secondaire, après redressement, débite dans le potentiomètre F par l'intermédiaire d'un rhéostat d'ajustement de la tension et comporte une petite batterie d'accumulateurs en tampon.



- C H A P I T R E I I -

DETECTION DES RAYONNEMENTS NOCIFS.- MESURE DE SANTE. [8]

1 - Danger présenté par les rayonnements radioactifs.

Les radioéléments, qu'ils soient naturels ou artificiels, présentent, du fait des rayonnements qu'ils émettent, un certain danger pour les travailleurs qui s'en servent. Indiquons, sans insister sur le caractère biologique de leur action, que ce danger est dû au pouvoir ionisant des rayonnements radioactifs, tels les rayonnements α , β , X et γ , ou encore à leur pouvoir de transmutation tels les neutrons suivis généralement de rayonnements ionisants, ces deux phénomènes créant des troubles de nature physico-chimique dans les tissus traversés. Ces troubles peuvent être minimes, anémie légère ou brûlure superficielle par exemple, et peuvent également devenir extrêmement nocifs et mortels par anémie généralisée, brûlures importantes, radiodermites et cancers.

Nous décrivons ici les appareils employés pour mesurer les rayonnements nocifs au voisinage des piles. Ces appareils permettent de déterminer les zones dangereuses et celles où la "dose de tolérance" n'est pas atteinte.

Le roentgen.

Le "roentgen" est la quantité d'un rayonnement X ou γ qui libère une unité électrostatique de charge par cm^3 d'air (dans les conditions normales de température et de pression). L'énergie ainsi libérée correspond à 83,3 ergs par gramme d'air.

Le symbole du roentgen est la lettre R. Les rayonnements α et β peuvent s'évaluer directement en roentgen, car leur effet, l'ionisation, correspond bien à une libération de charges. Il n'en est pas de même des rayonnements de neutrons. Pour pallier cette difficulté, on l'exprime en "rep" ou "roentgen équivalent physique"; le "rep" est la quantité de rayonnement qui crée le même effet physiologique qu'un rayonnement directement ionisant de 1 roentgen.

Dose de tolérance.

Cette dose a été déterminée par le calcul et par une suite d'expériences "in vivo". Elle est de 100 milliroentgens, environ, par journée de 8 h de travail (certains établissements adoptent 60 milliroentgens par 8 h). C'est la dose qu'un être humain peut supporter chaque jour sans dommage. La dose de tolérance adoptée pour les neutrons lents est de 100 millireps par 8 h de travail et correspond environ à un flux de 2 000 neutrons par seconde et par centimètre carré pour une exposition de 8 h. La dose adoptée pour les neutrons rapides correspond à un flux de 20 neutrons par seconde et par centimètre carré pour 8 h d'exposition.

Décrivons les appareils de mesure de rayonnements directement étalonnés en roentgen que nous avons conçus et réalisés pour installer dans les circuits de contrôle des piles.

2 - Chambre d'ionisation pour la détection des rayons γ (fig.10)

Ces chambres sont des chambres à gaz sous pressions diverses. Les gaz les plus couramment utilisés sont l'air, l'azote et l'hexafluorure de soufre. Le processus de l'ionisation des gaz par les rayons γ consiste essentiellement en absorption partielle de l'énergie des rayons γ par les électrons orbitaux des atomes, qui peuvent, de ce fait, quitter leur orbite. Par voie de conséquence, l'absorption est proportionnelle au nombre d'électrons présents par gramme de gaz, soit au quotient du numéro atomique par le poids atomique, d'où l'intérêt de l'emploi du gaz dont la densité est grande comme

l'hexafluorure de soufre.

Le rendement d'une chambre peut être assez bien déterminé par le calcul et étalonné en roentgen.

La formule correspondante est :

$$i = A \times P \times \Omega \times 1,15 \times 10^{-14}$$

où i est le courant d'ionisation en ampères,

A le rayonnement en roentgens/8 h,

P la pression en kg/cm^2

Ω la densité du gaz en prenant celle de l'air comme unité.

3 - Détecteurs de neutrons rapides.

On pourra, pour la détection des neutrons rapides, utiliser une chambre d'ionisation dite "à protons de recul". La chambre sera remplie généralement d'hydrogène sous haute pression. Les neutrons rapides peuvent agir sur les protons des noyaux et leur communiquer une partie de leur énergie. L'utilisation de cette propriété dans les chambres à détection de neutrons rapides implique cependant la nécessité de compenser le courant d'ionisation dû aux rayons γ qui accompagnent dans presque tous les cas les rayonnements de neutrons rapides. Cette compensation peut se faire au moyen d'une seconde chambre d'ionisation remplie à l'argon, montée en opposition avec la première. On peut également utiliser une chambre à neutrons lents placée dans un cylindre de paraffine de 15 cm d'épaisseur, lui-même entouré d'une mince feuille de cadmium. Les neutrons lents sont absorbés par le cadmium, seuls les neutrons rapides le traversent, sont ralentis par la paraffine et peuvent être comptés par une chambre à neutrons lents. Du fait des phénomènes de diffusion au cours du ralentissement dans la paraffine, tous les neutrons rapides ne traversent pas, après ra-

lentissement, la chambre d'ionisation. Un étalonnage particulier sera fait pour chaque géométrie d'un montage de ce genre.

L'expérience montre, cependant, qu'un montage de ce genre est peu sensible ; il conviendra d'utiliser de préférence une chambre à neutrons lents à impulsions ou un compteur à BF_3 . On pourra également utiliser la détection par photomultiplicateur et cristal à scintillation.

4 - Détecteurs de neutrons lents.

On pourra utiliser le même type de chambre d'ionisation déjà employé pour la mesure de la puissance de la pile. Remarquons que la dose de tolérance correspondant à un flux faible, il conviendra cependant d'augmenter la sensibilité des chambres soit en employant une chambre du type BF_3 , soit encore en augmentant le nombre de plateaux dans une chambre type B_4C . C'est ainsi qu'avec six plateaux (12 dépôts de B_4C) de 76 cm^2 chacun, on a un rendement

$$I_{\text{amp}} = 2.10^{-14} \text{ F}$$

F étant le flux traversant la chambre, soit pour 2 000 neutrons/s/cm² (dose de tolérance) :

$$I = 4.10^{-11} \text{ A,}$$

valeur aisément mesurable.

- C H A P I T R E I I I -

MESURE DE LA REACTIVITE. [13]

La mesure de la réactivité dans une pile atomique permet de prévoir, à chaque instant, l'évolution de la puissance de la pile ; elle permet d'assurer une sécurité qui provoque l'arrêt de la pile, ou la stabilisation de la puissance qu'elle fournit ; elle permet, par ailleurs, d'étudier l'influence sur la réactivité d'un certain nombre de facteurs, parmi lesquels nous citerons la température et le chargement de la pile en isotopes [14]. Comme nous l'avons vu (page 5), la puissance de la pile, abandonnée à elle-même, évolue suivant une loi exponentielle de la forme

$$P = P_0 \frac{\delta K t}{\tau}$$

où δK est de la forme

$$\delta K = K - 1$$

K est appelé le coefficient de reproduction des neutrons, τ la vie moyenne des neutrons thermiques produisant des fissions dans la pile et δK la réactivité, généralement exprimée en p.c.m. (pour cent mille).

Pour une pile divergente, on a $\delta K > 0$ (régime surcritique) ; pour une pile de puissance constante, $\delta K = 0$ (régime critique) ; pour une pile convergente, $\delta K < 0$ (régime subcritique) ; pour une pile à eau lourde, la loi

$$P = P_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}}$$

est suffisamment bien vérifiée si l'on adopte pour τ la valeur de 10^{-1} s, cette valeur tient compte des effets dus à la présence dans la pile de neutrons retardés.

la mesure de la réactivité peut donc se ramener à la mesure de δK le facteur de l'exponentielle.

$\frac{\delta K}{\tau}$ représente, en fait, la dérivée logarithmique de la puissance, soit :

$$\delta K = \frac{d \log P}{dt} \tau \quad (1)$$

$$\delta K = \frac{dP}{P dt} \tau \quad (2)$$

Pour mesurer la réactivité, on pourra d'après (1) prendre le logarithme de la puissance, puis sa dérivée par rapport au temps (procédé déjà décrit par plusieurs auteurs et sur lequel nous donnerons quelques précisions), ou, d'après (2), diviser la dérivée de la puissance par la puissance elle-même, méthode que nous avons utilisée comme base de deux des procédés que nous décrivons ici.

A - METHODE DE L'AMPLIFICATEUR LOGARITHMIQUE (fig.23)

La puissance de la pile est assurée à l'aide d'une chambre d'ionisation qui fournit un courant I qui lui est proportionnel. Dans le cas qui nous intéresse, cette chambre est suivie d'un amplificateur logarithmique tel que la tension de sortie de cet amplificateur soit toujours proportionnelle au logarithme de la puissance de la pile. Ce dispositif est suivi d'un circuit comprenant une capacité et un galvanomètre suivant la figure 22 [15].

Si j est le facteur de proportionnalité entre le courant de la chambre et la puissance de la pile, on peut écrire

$$I = jP, \quad P_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}}, \quad I = I_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}}$$

La tension de sortie de l'amplificateur est

$$v = k \log jP_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}}$$

où k est une constante de l'amplificateur.

Soit, par ailleurs, r_g la résistance interne du galvanomètre et C la capacité de dérivation et V_c la tension aux bornes du condensateur, on aura

$$v = k \log jP_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}} = V_c + r_g C \frac{dV_c}{dt},$$

dont la solution est

$$V_c = A e^{-\frac{t}{C r_g}} + \frac{\delta K}{\tau} k t + k \log jP_0 - \frac{\delta K}{\tau} k C r_g$$

où A est une constante d'intégration.

En choisissant $C r_g$ faible devant le temps de mesure, le terme transitoire $A e^{-\frac{t}{C r_g}}$ disparaît rapidement et l'on a

$$V_c = \frac{\delta K}{\tau} k t + k \log jP_0 - \frac{\delta K}{\tau} k C r_g.$$

Le courant traversant le galvanomètre sera

$$i_g = \frac{\delta K}{\tau} k C$$

où l'on voit que i_g est directement proportionnel à la réactivité δK .

L'amplificateur logarithmique utilisé doit couvrir une

grande gamme de mesure. Nous utilisons ici l'amplificateur à diodes qui donne une réponse logarithmique pouvant couvrir selon les diodes employées une gamme de courant de 10^{-14} à 10^{-6} A, avec une gamme de six puissances de dix pour une même diode (fig.24) [16], [17], [18].

Le facteur k reste toujours sensiblement égal à 0,0875 V, quel que soit le type de diode employé.

On choisira une capacité bien isolée et de grande valeur, afin que i_g soit aussi grand que possible, mais telle que C_{rg} reste faible devant le temps de mesure. A titre d'exemple, avec un galvanomètre de résistance interne $r_g = 1\ 000\ \Omega$, $C = 500\ \mu F$, on aura pour $K = 1$ p.c.m.

$$i_g = 4,3\ 10^{-10}\ \text{amp.}$$

Cette méthode donne de bons résultats. Signalons cependant qu'elle ne se prête directement, ni à l'installation d'un circuit de sécurité donnant un signal de déclenchement en cas d'excès de réactivité, ni à l'enregistrement (sauf enregistrement photographique peu commode à employer). Il convient de lui adjoindre un enregistreur très sensible comportant lui-même un amplificateur à courant continu ou à découpeur, sur lequel il sera possible d'installer des contacts de sécurité.

B - METHODE OSCILLOSCOPIQUE - PRINCIPE.

Les grandeurs $\frac{dP}{dt}$ et P obtenues électriquement sont transformées en tension alternative d'amplitude proportionnelle à la grandeur considérée par un découpeur électronique. Les deux tensions alternatives ainsi obtenues, convenablement amplifiées, maintenues en phase et sinusoïdales, sont appliquées l'une sur les plaques de déflexion verticales, l'autre sur les plaques de déflexion horizontales d'un tube oscilloscopique. La figure de Lissajoux ainsi obtenue

nue est une droite telle que la tangente de l'angle qu'elle fait avec l'horizontale est proportionnelle à δK (fig.26). La graduation en tangente (fig.25) est très favorable dans notre cas, car elle permet des mesures vers les petits angles (réactivité faible), l'échelle se resserrant pour les grands angles (réactivité forte). Elle permet de plus, grâce à cette échelle unique, de n'avoir à effectuer aucun changement de sensibilité. Le schéma de principe de l'appareil est représenté sur la figure 26. Le découpage, transformation des tensions continues en tensions alternatives, se fait ici par une méthode purement électronique (fig.27). La fréquence de découpage choisie est de 1 000 Hz.

L'amplificateur à courant continu employé donne une tension de sortie proportionnelle à la puissance de la pile ; soit g ce facteur de proportionnalité, g_1 et g_2 les gains respectifs des deux amplificateurs découpeurs, on aura

$$e_s = gP$$

d'où, sur les plaques verticales du tube, une amplitude

$$A_v = gg_1P$$

et sur les plaques horizontales

$$A_h = gg_2^{RC} \frac{dP}{dt}$$

d'où

$$tga = RC \frac{g_2}{g_1} \frac{dP}{Pdt} \quad \text{et} \quad \delta K = \frac{tga}{RC} \frac{g_1}{g_2} . 7 .$$

On voit que g n'intervient plus, il suffira de choisir g_1 et g_2 de manière à avoir la sensibilité désirée.

Cette méthode est assez délicate à mettre au point du fait de la difficulté de la mise en phase des signaux et dérivées de zéro des amplificateurs découpeurs. Elle donne néanmoins de bons résultats, mais ne se prête pas aisément à l'enregistrement ou à l'installation d'une sécurité (fig.28).

C - METHODE DU POTENTIOMETRE AUTOMATIQUE.

Cette dernière méthode effectue également la division de la dérivée de la puissance par la puissance elle-même, mais cette division s'effectue ici par un potentiomètre automatique à servomécanisme.

Le schéma de principe représenté sur la figure comporte successivement une chambre d'ionisation, un amplificateur à courant continu et un enregistreur à servomécanisme.

Cet enregistreur comporte un moteur diphasé dit "d'équilibrage" entraînant le curseur d'un potentiomètre à fil calibré. L'une des phases du moteur est alimenté par le secteur, l'autre phase est branchée à la sortie d'un "amplificateur de zéro" à découpeur dont le signal de sortie est proportionnel à la "tension d'erreur" qui se produit entre la tension d'entrée de l'enregistreur et la tension déterminée par la position du curseur sur le potentiomètre calibré. L'équilibre est donc atteint lorsqu'il y a égalité entre ces deux tensions.

Nous utilisons ici le circuit de la figure 29, la tension $R_2 i_2$ est fonction linéaire de la dérivée $\frac{dP}{dt}$ de la puissance, la tension sur le potentiomètre calibré est proportionnelle à la puissance P . Dans ces conditions à l'équilibre, le déplacement x du curseur se trouve être proportionnel à $\frac{dP}{P dt}$. Au curseur du potentiomètre est lié mécaniquement un chariot muni d'une plume inscri-

vant le déplacement x sur une bande de papier d'enregistrement. Des contacts de sécurité sont installés sur un point convenable de la course du chariot.

Calcul du circuit.

On aura

$$e_1 = E_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}} R_1 i_1 = R_2 i_2$$

aucun courant ne traversant à l'équilibre la branche AB

$$i_2 = i_1 + i \text{ et } i = C R_1 \frac{di_1}{dt}$$

l'équation du système est

$$(R_1 + R_2) i_1 + C R_1 R_2 \frac{di_1}{dt} = E_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}}$$

dont la solution est

$$i_1 = A e^{-\frac{R_1 + R_2}{C R_1 R_2} t} + \frac{E_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}}}{R_1 + R_2 + C R_1 R_2 \frac{\delta K}{\tau}}$$

En choisissant la constante de temps $\frac{C R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ de manière à ce que le terme transitoire

$$A e^{-\frac{R_1 + R_2}{C R_1 R_2} t}$$

disparaisse rapidement et $C R_1 R_2 \frac{\delta K}{\tau}$ étant négligeable devant $R_1 + R_2$ on a

$$i_1 = \frac{E_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}}}{R_1 + R_2}.$$

A l'équilibre, on a

$$x = \frac{R_2 i_2}{R_3 i_3}$$

avec

$$R_2 i_2 = E_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}} R_1 i_1 \text{ et } R_3 i_3 = \frac{R_3 E_0 e^{\frac{\delta K t}{\tau}}}{R_3 + R_4}$$

d'où

$$x = x_0 + \frac{C R_1 R_2 (R_3 + R_4)}{R_3 (R_1 + R_2)} x \frac{\delta K}{\tau}$$

avec

$$x_0 = \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{R_3 (R_1 + R_2)}.$$

On voit que ce résultat est une fonction linéaire de la réactivité δK . Il est évidemment indépendant de la puissance de la pile, dans la mesure cependant où la puissance dépasse un seuil tel que e_1 soit compatible avec la limite de la sensibilité de l'enregistreur. L'ordonnée à l'origine

$$x_0 = \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{R_3 (R_1 + R_2)},$$

indépendante de la puissance, permet de placer le zéro à un endroit quelconque de l'échelle de mesure et de mesurer ainsi des valeurs négatives de δK .

L'appareil que nous avons réalisé comporte un zéro central et deux échelles, l'une de -500 à +500 p.c.m., l'autre de -100 à +100 p.c.m. grâce à une commutation et un choix convenable des résistances R_1 , R_2 , R_3 , R_4 et de la capacité C .

2ème Partie

M E S U R E S N O N N U C L E A I R E S

- C H A P I T R E I -

REGLAGE DE LA PUISSANCE DE LA PILE

A - REGLAGE DU NIVEAU D'EAU LOURDE.

a) Pompe à eau lourde.

Dans le cas d'une pile à eau lourde, l'eau lourde stockée dans un réservoir placé dans le sous-sol du bâtiment peut être progressivement injectée dans la cuve de la pile au moyen d'une pompe actionnée par un moteur triphasé. Ce moteur est commandé à partir du pupitre. La marche de la pompe s'arrête du fait d'une minuterie toutes les 30 secondes. Il faut une nouvelle intervention de mise en marche pour continuer le pompage. Ce dispositif a pour but d'assurer une sécurité et d'éviter un remplissage trop important ou même dangereux en cas d'inattention de l'agent chargé de la conduite de la pile. Signalons, par ailleurs, qu'un verrouillage interdit la manoeuvre de la pompe à eau lourde au cas où les barres de sécurité ne seraient pas en position marche (hors du milieu multiplicateur). Ceci est indispensable pour régler le niveau au moyen de la lecture de la puissance et d'éviter toute réactivité excessive au moment de la mise en marche.

b) Lecture du niveau d'eau.

Le niveau d'eau peut être lu sur un niveau à tube d'eau apparent sur l'une des faces de la pile. On peut, pour des raisons de commodité et de précision, lui adjoindre un niveau dit "électrique" dont les indications sont reportées sur le tableau de commande.

c) Dispositif pour la mesure du niveau d'eau lourde (1).

Dans de nombreuses études relatives aux piles à eau lourde, il apparaît nécessaire de connaître le niveau d'eau lourde avec une précision d'une fraction de millimètre.

Un indicateur de niveau du type habituel, basé sur le principe des vases communicants, ne permet pas de fournir une telle précision. En effet, comme l'eau contenue dans le tube de niveau et l'eau de la cuve se trouvent la plupart du temps à des températures différentes, il peut en résulter des différences de l'ordre du centimètre entre le niveau indiqué et le niveau existant dans la cuve. En outre, un tel système ne se prête guère à la transmission d'indications à distance, ni à l'enregistrement.

Nous indiquerons ici quelques procédés que nous avons essayés en vue d'obtenir des mesures de niveau par des moyens électriques et décrirons un dispositif que nous avons réalisé au C.E.A. permettant l'indication et l'enregistrement à distance du niveau d'eau lourde, dans la Pile de Saclay [9].

Désirant nous affranchir de tout dispositif mécanique, nous

(1) Ce dispositif a fait l'objet d'un brevet accordé sous le n° 1 020 760.

avons tout d'abord tenté de résoudre le problème par des procédés purement électriques, basés sur la conductibilité et la constante diélectrique de l'eau lourde. Nous avons ainsi envisagé plusieurs systèmes dont le principe consistait à mesurer la résistance électrique ou la capacité entre des conducteurs immergés, ou encore utiliser un oscillateur à ondes centimétriques constitué par une ligne de Lecher plongée dans l'eau et à déterminer le niveau d'après les variations de fréquences produites.

L'expérience nous a montré qu'il fallait renoncer à des systèmes de ce genre, qui sont basés sur les propriétés électriques de l'eau, en particulier en raison des variations de celles-ci avec la température et à la présence de phénomènes tels que la formation de bulles gazeuses sur les électrodes, qui viennent modifier les conditions électriques des circuits (les bulles modifiant la résistance du circuit et non pas la résistivité de l'eau).

Nous avons donc été dans l'obligation de revenir à des dispositifs comportant un intermédiaire mécanique.

Parmi de nombreux systèmes qui peuvent être imaginés, un des plus simples est constitué par un fil résistant tendu verticalement dans la cuve et sur lequel se déplace un curseur mû par un flotteur. La mesure de niveau est ainsi ramenée à une mesure de résistance.

Un tel système est simple et robuste.

Toutefois, sous cette forme rudimentaire, celui-ci est inutilisable pratiquement pour l'application que nous avons en vue et ceci pour deux raisons :

1°) pour obtenir la précision de mesure désirée, il faudrait pouvoir discerner nettement une variation de résistance

correspondant à une fraction de millimètre du fil. Or, une telle variation de résistance n'est pas facilement mesurable, étant de l'ordre de grandeur des résistances de contact du curseur, sinon moindre ;

2°) de toute façon, une variation de niveau d'une fraction de millimètre ne communique pas au flotteur une force ascensionnelle suffisante pour vaincre les résistances de frottement et mouvoir le curseur.

Le système manquant de sensibilité, il conviendrait de lui adjoindre deux perfectionnements :

1°) faire en sorte qu'une variation de niveau d'une fraction de millimètre se traduise par une variation de résistance nettement mesurable ;

2°) utiliser une force motrice auxiliaire pour mouvoir le curseur.

Nous décrivons ici un système que nous avons mis au point et dans lequel ces deux principes sont mis en application.

Description.

Un fil d'acier "Invar" de 15/100 lesté par un plomb de sonde est enroulé sur un tambour entraîné par un petit moteur. Le tambour et le fil sont isolés de la masse et le plomb de sonde est terminé par une pointe de platine qui établit le contact avec l'eau dès qu'elle touche la surface.

Un dispositif électronique (fig.30) très simple établit, entre la position de la pointe et le sens de rotation du tambour, une relation telle que, lorsque le contact avec l'eau est établi,

la pointe tend à monter et, lorsque le contact est rompu, la pointe tend à descendre. Il en résulte un battement périodique de la pointe dans le sens vertical, d'environ 0,1 mm d'amplitude, de part et d'autre de la surface de l'eau (nous verrons plus loin que l'amplitude de ce battement est déterminée par des phénomènes de capillarité).

La longueur de fil déroulé dans la cuve et, par conséquent, la position angulaire du tambour, se trouvent donc fixées par le niveau de l'eau et ceci avec une grande précision.

La précision demandée en général sur la mesure de la hauteur de la surface de l'eau est de 0,5 mm ; d'autre part, l'amplitude maximum de la variation de cette hauteur des de 2 m. Il en résulte que nous serions amenés à effectuer des mesures avec une précision de 0,025 pour cent environ s'il n'y avait qu'une seule échelle de mesure.

Pour pallier cette difficulté, l'étendue totale de mesure à été divisée en 20 sections de 10 cm et la mesure répartie en deux opérations :

- a) mesure de précision dans une étendue de 10 cm,
- b) définition de la section dont il s'agit.

A cet effet, l'émetteur comprend un tambour fileté qui comporte 20 gorges d'enroulement du fil. Le diamètre du tambour est tel que chaque gorge contient exactement le logement de 10 cm de fil. Le tambour permet ainsi l'enroulement de 2 m de fil.

Sur le même axe est monté un potentiomètre de 13 cm de diamètre, tournant contre un curseur fixe et dont le bobinage occupe pratiquement les 360° de la circonférence, ce qui représente 40 cm de bobinage.

Le déroulement de 10 cm de fil correspond ainsi à un tour complet du potentiomètre, c'est-à-dire qu'une différence de niveau de 1 mm correspond à 4 mm de bobinage du potentiomètre. Ceci permet une mesure précise du niveau dans une étendue de 10 cm et constitue le dispositif "fin" de mesure.

Par suite de cette disposition, on retrouve évidemment les mêmes mesures de 10 en 10 cm. Pour définir la décade dont il s'agit, un second potentiomètre identique est monté sur un axe démultiplié au vingtième par rapport à l'axe précédent, de sorte que sa rotation complète correspond à un dévidement de 2 m de fil. Ce potentiomètre constitue le dispositif "grossier" de mesure.

Les mesures de résistance sont effectuées automatiquement par un appareil indicateur-enregistreur à deux voies qui commute tour à tour le circuit de mesure sur le potentiomètre "grossier", puis sur le potentiomètre "fin". Le montage est prévu de telle sorte que les résistances des fils de ligne de liaison se neutralisent, ce qui permet de placer l'enregistreur à une distance pratiquement illimitée de la pile sans introduire d'erreur par suite de la résistance de la ligne. L'appareil est muni de deux échelles "mètres" et "millimètres", ce qui permet une lecture directe et instantanée du niveau. En même temps, l'appareil assure un enregistrement permanent de la hauteur d'eau sous forme de deux courbes de couleur différente.

L'enregistreur, situé sur le tableau de commande de la pile, fonctionne en permanence, mais, afin de ne pas fatiguer inutilement le mécanisme "démoteur" (qui est placé dans la pile et dont l'accès est, par conséquent, condamné), une marche intermittente a été prévue. Un contact automatique actionné par l'enregistreur met le mécanisme sous tension toutes les demi-heures pendant 2 mn. Le système effectue ainsi une mesure du niveau toutes les demi-heures, ce qui est largement suffisant pour les besoins courants.

Le relais qui commande le sens de rotation du tambour commande également deux lampes de signalisation indiquées "montée" et "descente". Le clignotement incessant de ces lampes indique que le niveau est stable et que la pointe oscille autour de la surface de l'eau. En cas de montée ou de descente du niveau, le système suit le mouvement de l'eau, ce qui entraîne la fixité de la lampe correspondante et l'extinction de l'autre.

Un rupteur en fin de course, actionné par une came montée sur l'axe du potentiomètre "grossier", coupe l'alimentation du moteur par mesure de sécurité au cas où, par suite d'une panne des circuits électroniques, le moteur continuerait indûment sa course dans un sens ou dans l'autre.

Enfin, pour éviter la condensation de vapeur d'eau dans le mécanisme émetteur, une résistance chauffante maintient en permanence l'enceinte dans laquelle est monté le mécanisme à une température supérieure à celle de la cuve.

Précision des mesures.

Le bobinage du potentiomètre "fin" comportant trois spires au millimètre et 1 mm de différence de niveau correspondant à 4 mm de bobinage, soit à 12 spires, le système possède un pouvoir de définition capable de fournir le dixième de millimètre.

L'enregistreur permet des mesures à mieux que 0,3 pour cent de précision.

D'autre part, afin d'éviter les erreurs dues aux variations de température, le fil de sonde et le tambour d'enroulement sont en acier Invar, de sorte que la variation de la longueur totale du fil pour des variations de température de 100° est inférieure à 0,2 mm.

Une dernière cause d'erreur à examiner réside dans la plage d'incertitude créée par le battement de la pointe à la surface de l'eau. L'amplitude de ces battements est déterminée, non pas comme on pourrait le croire par l'inertie mécanique du système (celui-ci étant très démultiplié), mais par les phénomènes de capillarité au contact de la pointe avec la surface de l'eau. En utilisant une pointe très fine en platine, la plage d'incertitude peut être réduite à environ 0,1 mm.

On voit que les erreurs susceptibles de se présenter ne dépassent pas le quart de millimètre.

L'appareil fournit donc largement la précision de mesure demandée de $\pm 0,5$ mm.

B - POSITIONNEMENT DES PLAQUES DE REGLAGE PAR SERVOMECHANISME.

Dans un chapitre précédent, nous avons vu que le contrôle d'un réacteur nucléaire est effectué en enfonçant plus ou moins dans le milieu réacteur des plaques absorbant des neutrons. Ces plaques de réglage contiennent un élément tel que le cadmium ou le bore qui ont une grande section efficace de capture pour les neutrons thermiques. ⁽¹⁾

Une plaque de réglage et son dispositif de suspension pèsent quelques dizaines de kg et la course totale de la plaque est de quelques mètres, de l'ordre de grandeur des dimensions linéaires du réacteur.

(1) Une plaque placée entre le milieu réacteur et le réflecteur agit sur les neutrons de fuite, alors qu'une plaque placée dans le milieu réacteur agit sur la distribution de la densité neutronique.

Afin de ne pas encombrer les abords immédiats du réacteur, la commande des plaques de réglage se fait à partir de la cabine de contrôle pouvant se trouver à quelques mètres de distance du réacteur, d'où la nécessité d'utiliser une télécommande.

La plaque de réglage et son dispositif de suspension se déplaçant dans un important flux de neutrons deviennent rapidement très radioactifs, ce qui rend dangereuse toute manipulation directe nécessitée par un dépannage éventuel. Le système doit donc être extrêmement robuste et d'un démontage facile et rapide.

De tels dispositifs de télécommande de position ont déjà été décrits, et nous ne rappellerons ici que les principes généraux de deux d'entre eux, qui peuvent, d'ailleurs, être utilisés concurremment.

Dispositif de commande discontinue.

Le schéma de principe de ce dispositif est donné par la figure 31. Ce système se compose essentiellement d'un tambour T autour duquel s'enroulent les rubans de suspension de la plaque de réglage ; d'un train d'engrenages E reliant le tambour au moteur d'entraînement M, de préférence triphasé à cage d'écureuil, d'un système de repérage d'angle SE, couplé par un train d'engrenages E au tambour (synchro émetteur par exemple) et de deux contacteurs de fin de course. Au pupitre de commande, on dispose de trois boutons poussoirs : montée, descente, arrêt, et d'un téléindicateur de position SR (synchro récepteur) à cadran indicateur.

Dispositif de commande continue.

Dans certaines conditions, il est désirable de disposer d'au moins une plaque de réglage pouvant être déplacée d'une façon continue ; dans ce cas, on emploie un système de télécommande de position [20].

Décrivons le système utilisé dans le contrôle des réacteurs de Châtillon et de Saclay, dont le schéma de principe est donné par la figure 32.

Ce système se compose essentiellement d'un moteur d'entraînement M couplé par un train d'engrenages E au tambour d'enroulement des rubans de suspension de la plaque de réglage, lequel à son tour est couplé par un train d'engrenages E au synchro récepteur SR. Le moteur M est alimenté par un amplificateur de puissance A précédé d'un préamplificateur PA dont l'entrée se trouve reliée en série avec le rotor du synchro émetteur SE et celui du synchro récepteur SR.

En fait, dans la pratique, étant donné l'écart entre la précision demandée pour le positionnement des plaques et celle d'un synchro, le déplacement total de la plaque correspond à plusieurs tours du synchro ; une erreur d'un nombre entier de tours est possible en cas de coupure de courant et il est nécessaire de disposer d'un deuxième synchro ne tournant que d'un demi-tour pour toute la course de la plaque.

- C H A P I T R E I I -

SECURITE, VERROUILLAGE.

La sécurité de fonctionnement d'un réacteur sera assurée par un certain nombre de verrous qui commandent des relais placés dans une chaîne, de sorte que si l'un d'eux déclenche, les barres de sécurité pénètrent dans le milieu multiplicateur. Le déclenchement du relais est toujours par "défaut". La réaction s'arrête, par la chute des barres, si l'une des conditions suivantes est remplie :

- 1°) la température des cartouches dépasse une valeur donnée fixée à l'avance (ou le galvanomètre enregistreur de mesure de cette température n'est plus alimenté ou si son cadre est coupé) ;
- 2°) la réactivité dépasse une valeur fixée à l'avance ;
- 3°) la puissance du réacteur dépasse une valeur fixée à l'avance ;
- 4°) un des amplificateurs des chambres d'ionisation est en panne ;
- 5°) la tension secteur est insuffisante.

Certaines conditions de fonctionnement ne doivent pas entraîner l'arrêt immédiat du réacteur, mais il est indispensable d'en être informé ; dans ce cas, on déclenche un signal d'alarme. Citons en exemple quelques-unes de ces conditions :

- 6°) la température du ralentisseur dépasse une valeur donnée fixée à l'avance ;
- 7°) l'activité du rayonnement autour du réacteur dépasse

la dose de tolérance ;

8°) les produits de fission ont pollué le fluide de refroidissement.

Inversement, on ne pourra pas démarrer le réacteur si l'une des conditions 1° à 7° n'est pas remplie. On peut imposer d'autres conditions de pré-démarrage, par exemple :

1°) la circulation du fluide de refroidissement doit être assurée ;

2°) les plaques de réglage doivent être dans la position basse, où elles ont le maximum d'effet.

Dans certains réacteurs, d'autres verrouillages peuvent être envisagés, par exemple dans un réacteur à eau lourde, la pompe de remplissage de la cuve de réaction à partir du réservoir de stockage ne peut démarrer que si les barres de sécurité sont en position marche, ceci afin d'éviter d'emballer le réacteur au cas où le niveau d'eau serait trop élevé.

Etant donné le grand nombre de conditions pouvant amener l'arrêt du réacteur on dispose, généralement, sur le tableau de commande d'une série d'indications permettant de localiser l'organe responsable du déclenchement (fig. 23).

- C H A P I T R E I I I -

MESURES THERMODYNAMIQUES [21] [22]

Un appareillage de mesures thermodynamiques est installé sur le tableau de commande des piles à refroidissement. Son but est de mesurer la puissance thermique réellement dégagée par le réacteur et cédée au fluide de refroidissement. La valeur de cette puissance est inférieure de quelques pour cent à la puissance neutronique mesurée par les chambres d'ionisation. Cette différence est due essentiellement à deux causes. En effet, d'une part, le dispositif de mesures thermodynamiques ne mesure pas intégralement toute la chaleur dégagée en raison des pertes calorifiques nombreuses ; d'autre part, toute la puissance neutronique n'est pas transformée en chaleur à l'intérieur même du réacteur, une partie non négligeable de rayonnement pouvant s'en échapper.

Mesures des calories évacuées par le système de refroidissement.

Cette mesure se fait à partir des mesures précédentes de débit pression et températures. Un appareillage électromécanique est souvent utilisé pour réaliser le produit du "débit poids" par la différence de température entre l'entrée et la sortie du réacteur. Cet appareillage se trouve couramment dans d'autres applications industrielles. Ses indications sont corrigées par une mesure de température et une mesure de pression. Elles sont enregistrées au tableau de commande directement en kilogrammes par heure. Les températures amont (T_e) et aval (T_s) sont également

enregistrées. Le produit de ces deux indications et de la masse spécifique du fluide permet de connaître à chaque instant le nombre de calories enlevées par le fluide de refroidissement.

Dans le cas de l'azote on aura :

$$N_{\text{Cal/heure}} = \text{Débit kg/heure} (T_s - T_e) \times 0,248$$

d'où

$$\text{Puissance kW} = \frac{N_{\text{Cal/heure}}}{860}$$

Mesure des températures [23]

Nous avons vu précédemment que la puissance maximum d'un réacteur est limitée par l'échauffement que l'on peut admettre pour les matériaux entrant dans la construction du réacteur. Ce sont, en particulier, les températures maximum permises pour les cartouches d'uranium, le ralentisseur et le protecteur qui imposent cette limitation. Dans ce qui suit, nous passons en revue, brièvement, les caractéristiques principales des thermomètres destinés à être placés à l'intérieur du réacteur, à l'exclusion des thermomètres extérieurs utilisés pour la mesure des températures du fluide de refroidissement, des paliers de moteurs, etc... qui sont bien connus.

Les caractéristiques principales des thermomètres sont bien déterminées ; ils devront :

- 1°) être de faibles dimensions,
- 2°) absorber peu de neutrons,
- 3°) conserver leurs propriétés quand ils sont soumis à d'importants flux neutroniques.

Cette dernière condition élimine la plupart des thermistances qui sont généralement des semi-conducteurs dont les propriétés se modifient sous l'influence d'un flux important de neutrons.

Sondes.

De bons résultats ont été obtenus avec les thermo-couples suivants : argent-constantan, fournissant une f.e.m. de 3,8 mV/100°C, pour les températures inférieures à 150°C, et cuivre-constantan, fournissant une f.e.m. de 4 mV/100°C pour les températures supérieures à 150°C.

Ces couples isolés sous vétrotex, tissu de verre dont la tenue aux neutrons est bonne, ont un diamètre de l'ordre de 2,5 mm.

Câble de compensation.

Il est avantageux d'inclure la compensation automatique de la soudure froide dans l'appareil de mesure. Ainsi des câbles de compensation isolés sous amiante et gainés d'une tresse de cuivre étamé reliant les couples, dès leur sortie du réacteur, au tableau de commande. On évite ainsi d'avoir des "soudures froides" au voisinage immédiat du réacteur.

Appareils de mesures.

Les différentes températures mesurées sont enregistrées. A cet effet, on utilise des enregistreurs du type "pyromètre potentiomètre automatique", dont la précision est de l'ordre de 0,5 pour cent. Avec ces appareils de mesure et les sondes citées plus haut, on peut obtenir une précision de 1 degré sur la mesure d'une température de 200°C. Dans les cas où les températures varient lentement dans le temps, on peut grouper sur le même enre-

gisteur la mesure de plusieurs températures (jusqu'à 16) (fig.34).

Sécurité.

Certaines températures, telles que celles des cartouches d'uranium, ont des limites supérieures très strictes. Si, au cours du fonctionnement du réacteur, cette limite supérieure vient à être dépassée, il est indispensable de stopper le réacteur. Dans ce but, on utilise un contact dont l'ouverture, commandée par le chariot de l'enregistreur, est obtenue lorsque la température dépasse une limite fixée à l'avance et permet le déclenchement du dispositif de sécurité (fig. 35).

De même, au début de l'échelle, un contact à ouverture permet de signaler certaines pannes de l'enregistreur telles que rupture de la suspension du galvanomètre et abaissement de la f.e.m. de la pile alimentant le potentiomètre.

- C O N C L U S I O N -

La mesure de la puissance d'un réacteur est réalisée de la façon la plus commode à l'aide de chambres d'ionisation. On a montré que les chambres d'ionisation à dépôt de bore étaient amplement suffisantes au point de vue sensibilité et présentent l'avantage d'être peu sensibles au rayonnement gamma. Elles sont par ailleurs de construction aisée. Le courant d'ionisation est mesuré à l'aide de l'amplificateur à courant continu que nous avons mis au point et dont les performances sont particulièrement bien adaptées à l'usage que l'on en fait ici pour le contrôle d'une pile (impédance d'entrée : $10^{14} \Omega$, dérive inférieure à 5 mV/24 h) ; de plus, la commutation de sensibilité se fait sur l'amplificateur lui-même et non pas en tête d'amplificateur par commutation des résistances de haute valeur. On a obtenu par ailleurs, à l'aide d'un condensateur vibrant, des performances supérieures (son impédance d'entrée atteint $10^{18} \Omega$ et sa dérive est inférieure à 1 mV/24 h). On indique également un procédé de fabrication de résistances de haute valeur qui conduit à des caractéristiques largement suffisantes pour la précision de mesure recherchée (coefficient de tension 0,1 pour cent par volt ; coefficient de température -0,1 pour cent par degré). Un procédé de mesure des grandes résistances a été mis au point. Il est basé sur l'utilisation d'une chambre d'ionisation à $^{14}\text{CO}_2$ génératrice d'un courant constant et qui permet l'appréciation avec 3 chiffres significatifs de résistances allant jusqu'à $10^{13} \Omega$.

On décrit un procédé commode d'utilisation d'une chambre d'ionisation en y incorporant une "pile électrode" permettant la suppression de l'anneau de garde des chambres d'ionisation.

On a réalisé deux méthodes originales pour la mesure de la réactivité d'une pile. L'une de ces méthodes, particulièrement aisée à mettre au point, permet la mesure de réactivité de quelques 10^{-5} .

Un appareillage de mesure à distance du niveau d'eau lourde dans un réacteur à eau lourde a été imaginé et réalisé et permet la mesure de 1/4 de millimètre près d'un niveau d'eau pouvant varier de 0 à 2 m.

On a traité également les questions non nucléaires comme les asservissements de plaques ou de barres de contrôle et de sécurité et on insiste en particulier sur les circuits de sécurité nécessaires dans le contrôle d'un réacteur nucléaire.

On a résolu le problème des mesures de températures par l'emploi de thermocouples, dont la tenue aux neutrons est parfaite et qui, sous un faible encombrement, permettent néanmoins des mesures à 0,5 pour cent.

B I B L I O G R A P H I E

- [1] - JACROT B., NETTER F., RAIEVSKI V. - Les piles atomiques - Electricité - mars 1953, 192, 49-56.
- [2] - ISBIN H.S. - Nuclear reactor catalog - Nucleonics, mars 1952, 10-17.
- [3] - JAKUES T.A.J., BALLINGER H.A., WADE F. - Neutron detectors for reactor instrumentation - Proc. Inst. Electr. Engrs., 1953, 100, part. 2, 74, 197-198.
- [4] - BRIGHT W.C. - Spiral fission chambers - Declassified Document 7/30/46 - M.D.D.C. 91.
- [5] - LABEYRIE J., LALLEMANT C., WEILL J. - Chambre d'ionisation à dépôt de carbure de bore pour la mesure des flux de neutrons thermiques - J. Phys. Radium, oct. 1951, 12, 32A-36A.
- [6] - ROGOZINSKI A. - Les lampes électromètres - Techniques générales du Laboratoire de Physique, Paris 1950 (Tome II).
- [7] - VAN BLITZ V., WEILL J. - Commutateur potentiométrique pour la mesure des tensions continues - J. Phys. Radium, oct. 1951, 12, 78A-80A.
- [8] - WEILL J. - Les appareils de mesure destinés à la protection du personnel contre les rayonnements radioactifs - Onde électrique, 1950, 270, 328.
- [9] - RAIEVSKI V. - Rapport intérieur C.E.A. du 20 mars 1952.

- [10] - BRISTEAU P. - Piles haute-tension de faible volume - J. Phys. Radium, 1951, 12, 74A.
- [11] - BRISTEAU P., WEILL J. - Dépôt de brevet.
- [12] - WEILL J. - Dépôt de brevet.
- [13] - WEILL J. - Appareillage pour la mesure de la réactivité dans une pile atomique - J. Phys. Radium, février 1953, 14, 77-81. Nucleonics, mars 1953, 36-39.
- [14] - GLASSTONE S., EDLUND M.C. - Nuclear reactor theory - Mc. Millan et C° Ltd. Londres 1952.
- [15] - OZEROFF W.J. - The science and engineering of nuclear power edited by Clark Goodman - Addison-Wesley Press Inc. Cambridge, 42, mars.
- [16] - RICHARDSON C.W. - Phil. Mag., 1912, 23, 263.
Phil. Mag., 1912, 24, 737 - The emission of electricity from hot bodies - Longmans, Green and C° 1921.
- [17] - DUSHMAN S. - Phys. Rev., 1912, 4, 121.
- [18] - BRIERE M., ROGOZINSKI A., WEILL J. - Amplification logarithmique des courants faibles - J. Phys. Radium, 1951, 12, 144.
- [19] - WEILL J., BRIERE M. - Dispositif pour la mesure du niveau d'eau lourde dans le réacteur de Saclay - J. Phys. Radium, 1953, 14, 46-49.
- [20] - POTTIER J., RAIEVSKI V. - Télécommande de la réactivité de la pile - Onde électrique, juillet 1950.
- [21] - LE MEUR E. - Système de refroidissement de la pile de Saclay - Techniques modernes, juin 1953, 45, 241-244.

- [22] - LEDUC C. - Contrôle des installations de refroidissement du réacteur de Saclay - Onde électrique, août 1954.
- [23] - WEILL J., RASTOIX G. - La mesure des températures dans les piles atomiques françaises - Rapport C.E.A. n° 51, 1951.
- [24] - SURDIN M., WEILL J. - Contrôle des réacteurs nucléaires - Electricité, juin 1953, 195, 120.
- [25] - HARRER J.M. - Controlling a power-producing nuclear reactor. Nucleonics, mars 1950, 58-65.
- [26] - BOWEN J.H. - Automatic control characteristics of thermal neutron reactor - Proc. Inst. Electr. Engrs., 1953, 100, part. 2, 74, 200.
- [27] - MOORE R.V. - The control of a thermal neutron reactor - Proc. Inst. Electr. Engrs., 1953, 100, part. 2, 74, 197-198.
- [28] - TRIMMER J.D., JORDAN W.H. - Instrumentation and control of reactors - Nucleonics, octobre 1951, 60-68.

T A B L E des M A T I E R E S

	Pages
INTRODUCTION : Les Piles à uranium naturel	5
<u>1ère PARTIE : MESURES NUCLEAIRES</u>	
<u>CHAPITRE I</u> - Mesure de la puissance par la mesure du flux de neutrons thermiques.	
I - Détecteurs de neutrons thermiques	
1 - Thermopiles à bore	9
2 - Chambres d'ionisation	10
3 - Chambre d'ionisation de démarrage	17
4 - Simplification de la construction des chambres d'ionisation par utilisation d'une pile électrode	19
II - Mesure des courants continus faibles	
1 - Le galvanomètre	22
2 - L'électromètre	22
3 - L'amplificateur à courant continu et lampe électromètre	23
4 - L'électromètre à condensateur vibrant	26
5 - Résistances de haute-valeur	28
6 - Mesure de précision des résistances	32
7 - Commutateur potentiométrique pour la mesure fine de puissance	35
<u>CHAPITRE II</u> - Détection des rayonnements nocifs	
1 - Danger présenté par les rayonnements radioactifs, le roentgen, la dose de tolérance	43
2 - Chambre d'ionisation pour la détection des rayons γ	44
3 - Détecteurs de neutrons rapides	45
4 - Détecteurs de neutrons lents	46

CHAPITRE III - Mesure de la réactivité

A - Méthode de l'amplificateur logarithmique	48
B - Méthode oscilloscopique	50
C - Méthode du potentiomètre automatique	52

2ème PARTIE : MESURES NON NUCLEAIRES

CHAPITRE I - Réglage de la puissance de la pile

A - Réglage du niveau d'eau lourde - Dispositif de mesure du niveau d'eau lourde	55
B - Positionnement des plaques de réglage par servomécanisme	62

CHAPITRE II - Sécurité, verrouillage

65

CHAPITRE III - Mesures thermodynamiques

67

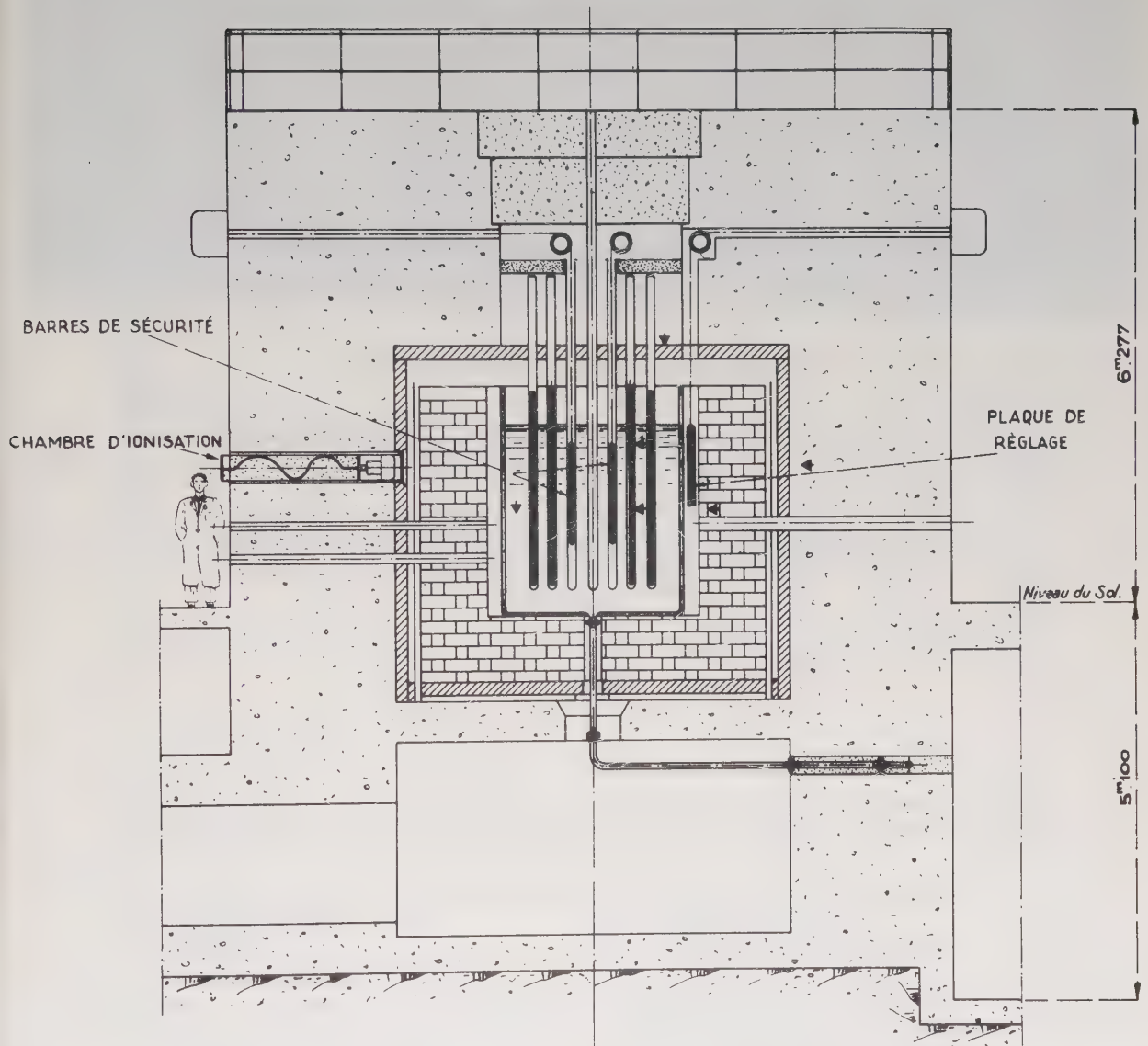
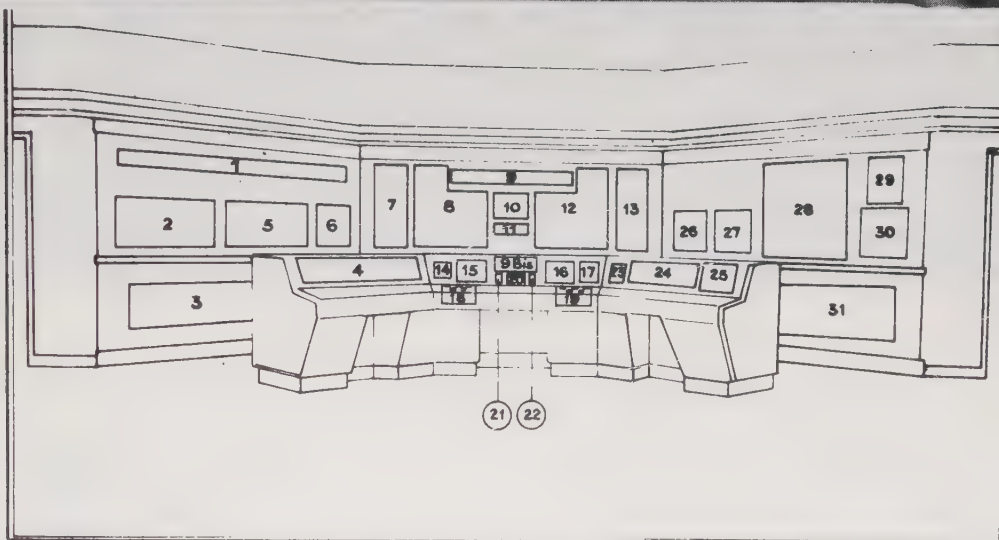
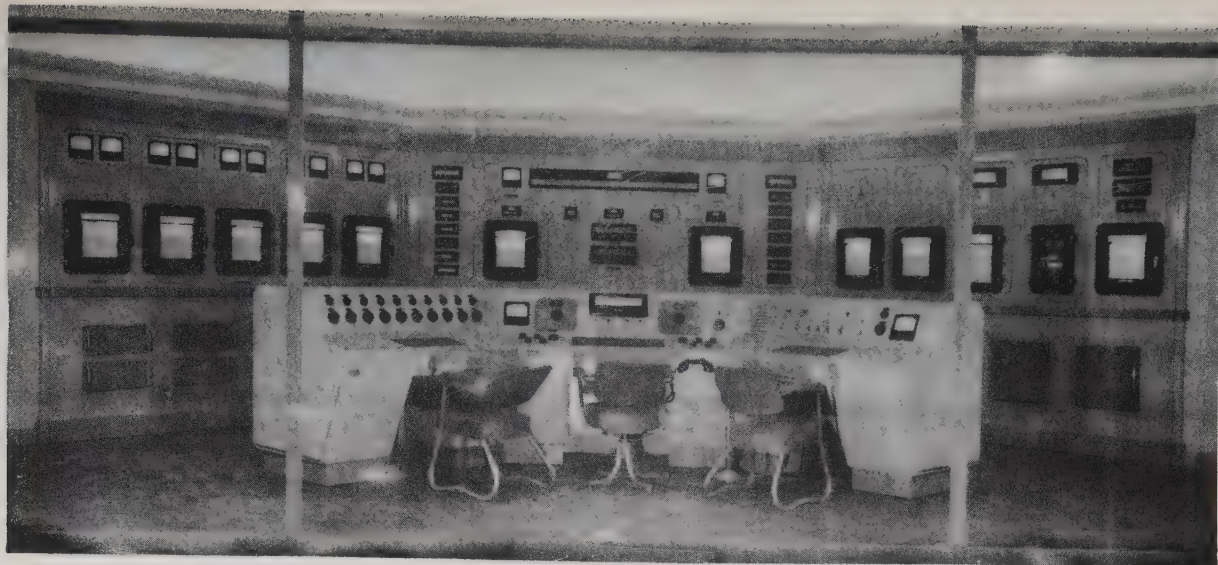


Figure 1

Coupe d'un réacteur à eau lourde



NOMENCLATURE

- | | |
|--|---|
| 1 Mesures de santé, Neutrons lents, Neutrons rapides, β et Fuites. | 16 Emetteur de plaque de réglage Sud. |
| 2 Enregistreurs des mesures de Santé. | 17 Téléphone. Interphone. |
| 3 Amplificateurs | 18 Commande des Chaines de Puissance. |
| 4 Commandes des Amplificateurs de Santé | 19 ——— d° ——— |
| 5 Mesure des Températures, Uranium, D_2O , Graphite, Béton. | 20 Commande des barres de Sécurité. |
| 6 Mesures de Températ. de Catalys, du Taux d'oxygène et du Taux de déterium. | 21 Déverrouillage des voyants de déclenchement. |
| 7 Signalis. des organes en déclenchement. | 22 Mise en rotation Vernier de Puissance |
| 8 Mesure et Enregistrement, Chaîne de Puissance 1. | 23 Haut-Parleur Interphone. |
| 9 Rampe lumineuse de paliers de puissance. | 24 Commandes Pompe à D_2O , Servo-Mesur. Mesures Thermodynam. |
| 9Bis Vernier de Mesure de Puissance. | 25 Mesure sur Ampli de Manipul. |
| 10 Mesure Chaîne de Puissance 4. | 26 Enregistreur Réactivité. |
| 11 Mesure d'une Température de Barre d'Uranium. | 27 ——— d° ——— Niveau D_2O |
| 12 Mesure et Enregistrement, Chaîne de Puissance 2 | 28 Mesures Thermodynamiques. |
| 13 Signalisation des voyants de Fonctionnement. | 29 Signalisation Canaux Irradiation. |
| 14 Mesure de Puissance, Chaîne 3. | 30 Enregistrement Vernier de Puissance. |
| 15 Emetteur de plaque de réglage Nord. | 31 Amplis. Servo-Mécanisme. |

Figure 2

Salle de contrôle d'un réacteur à eau lourde
(réacteur P_7 de Saclay)



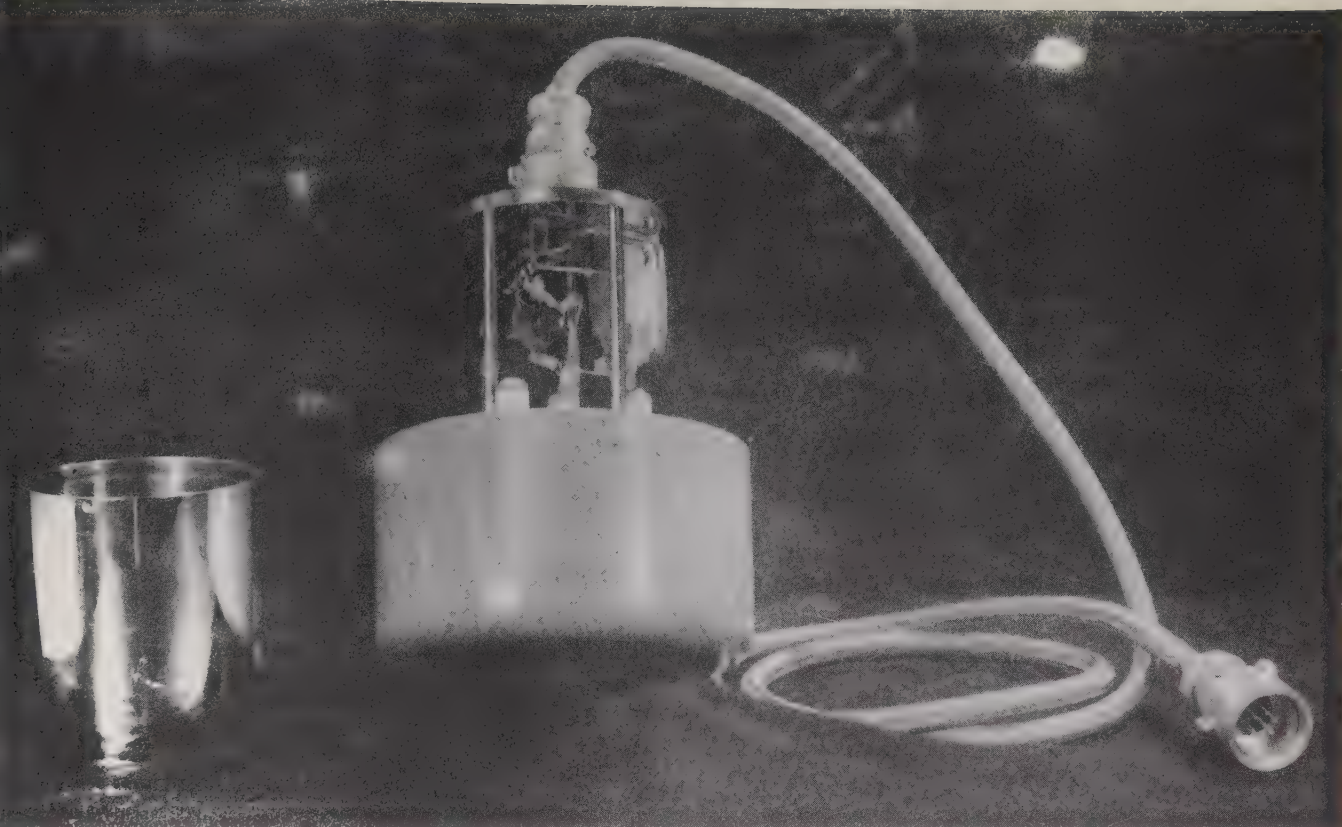


Figure 3

Vue d'une chambre d'ionisation à B_4C
(le couvercle du préamplificateur a été enlevé).

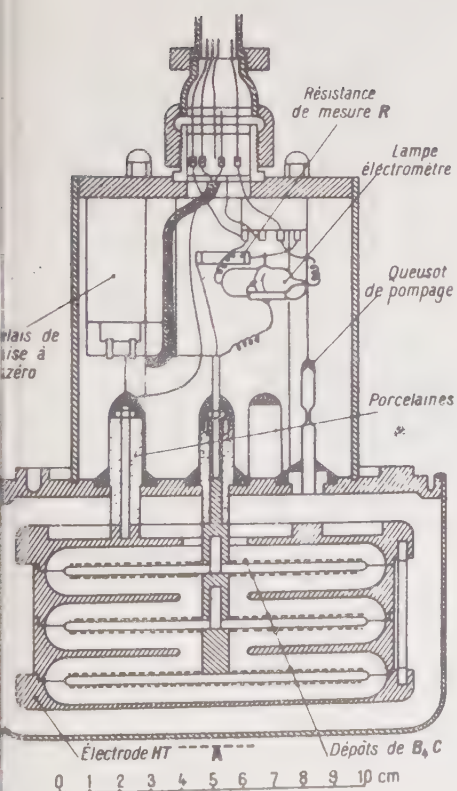


Figure 4

Coupe d'une chambre
d'ionisation à B_4C

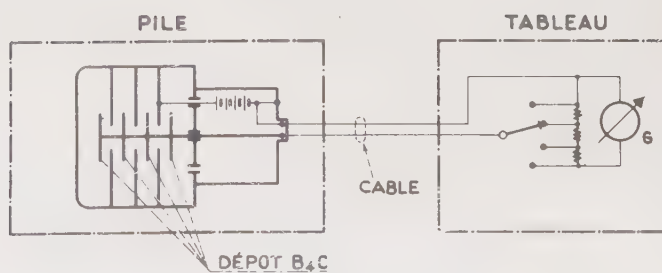


Figure 5

Montage d'une chambre d'ionisation
et d'un galvanomètre







CONDENSATEUR VIBRANT
ET PREAMPLIFICATEUR.

AMPLIFICATEUR.

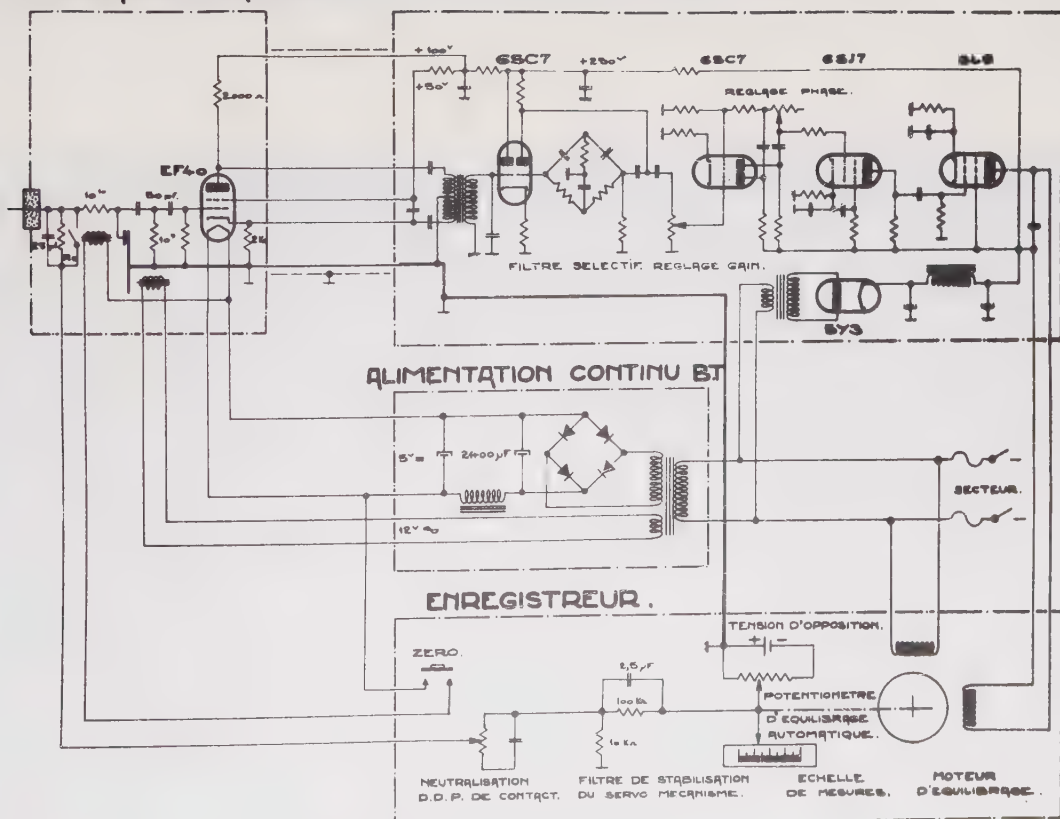


Figure 8

Electromètre à condensateur vibrant



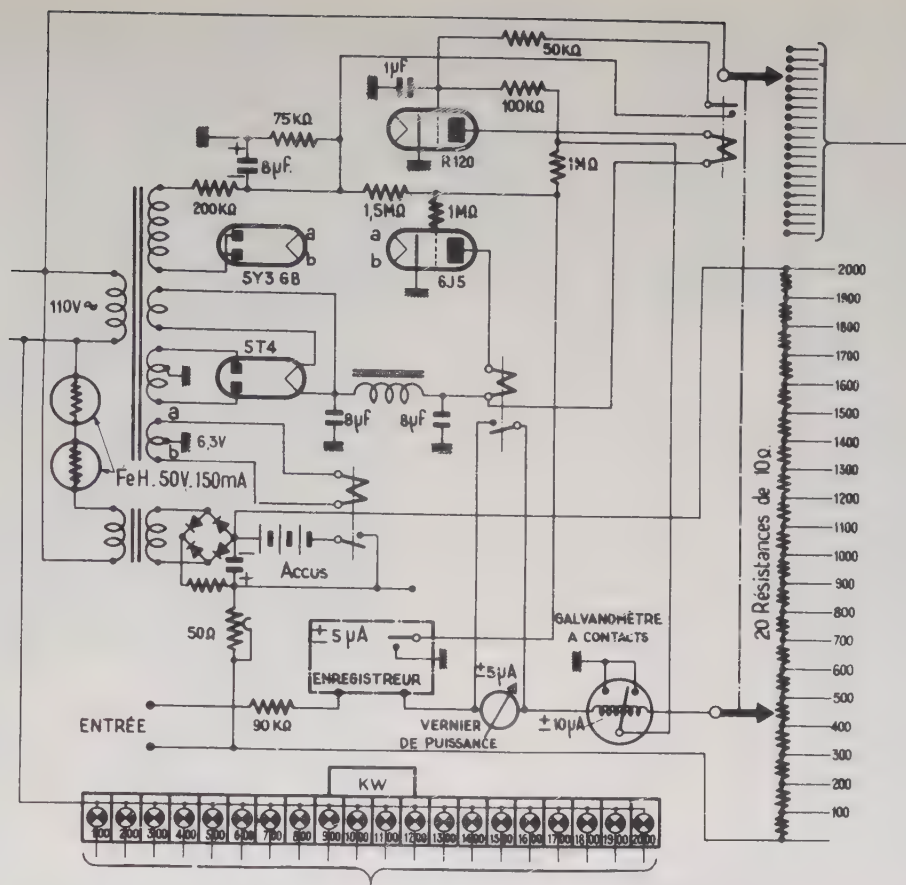


Figure 9

Mesure fine de la puissance par commutateur potentiométrique

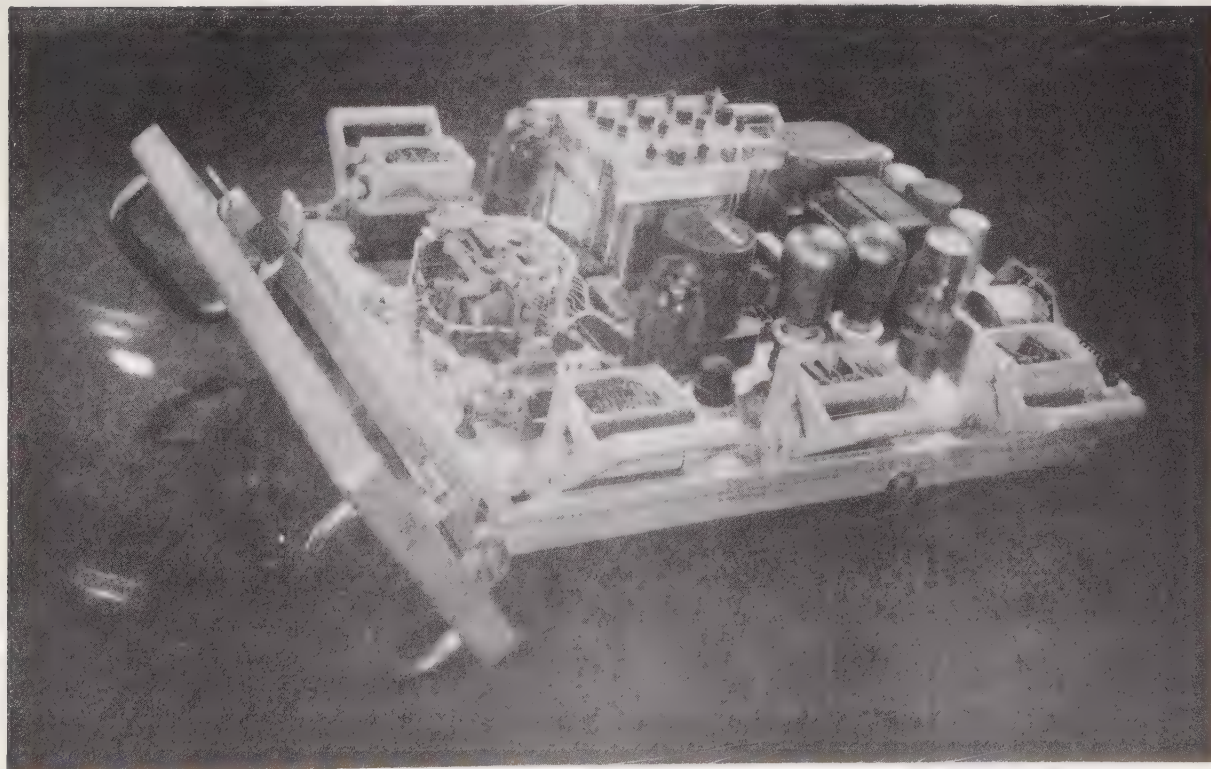


Figure 9 bis

Vue du chassis de mesure fine de puissance



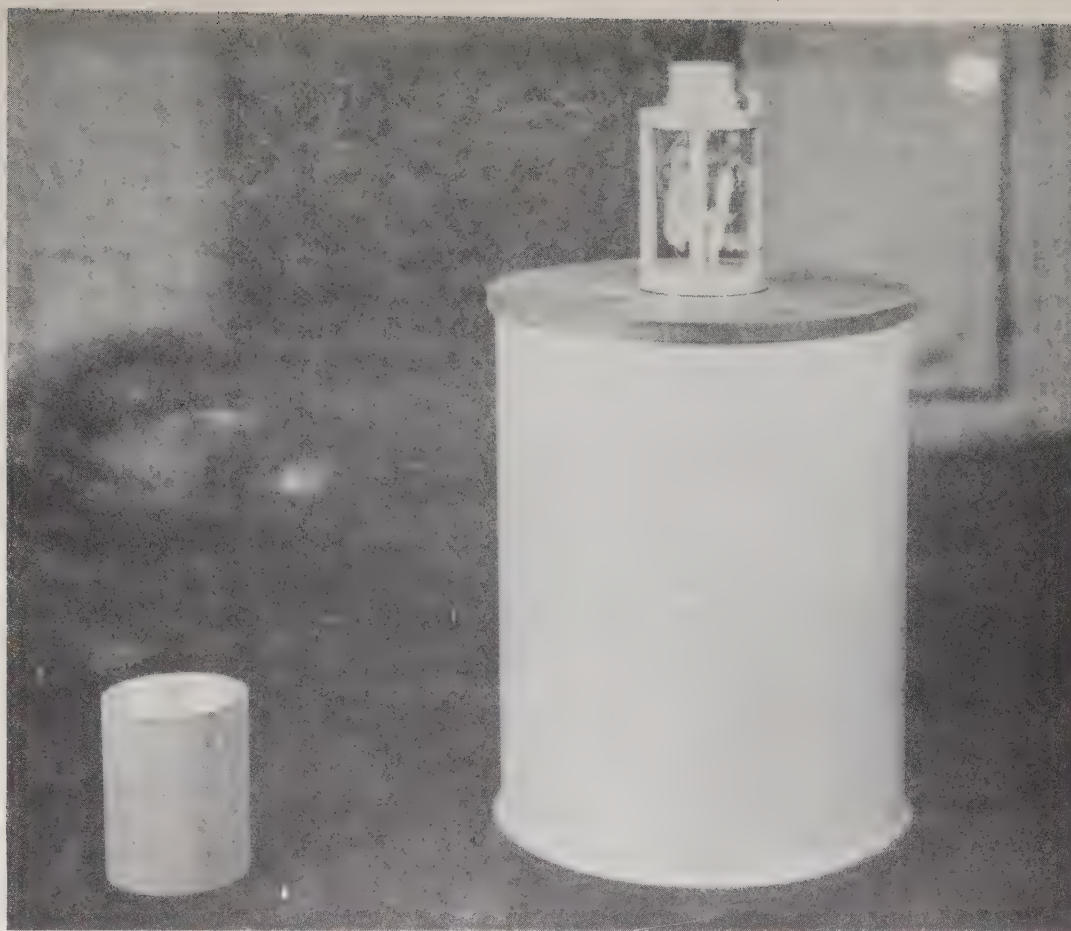


Figure 10

Chambre d'ionisation à rayons γ
(le couvercle du préamplificateur a été enlevé)

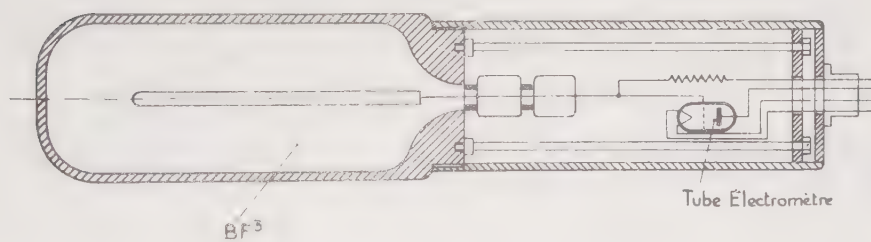


Figure 11

Chambre de démarrage à BF_3

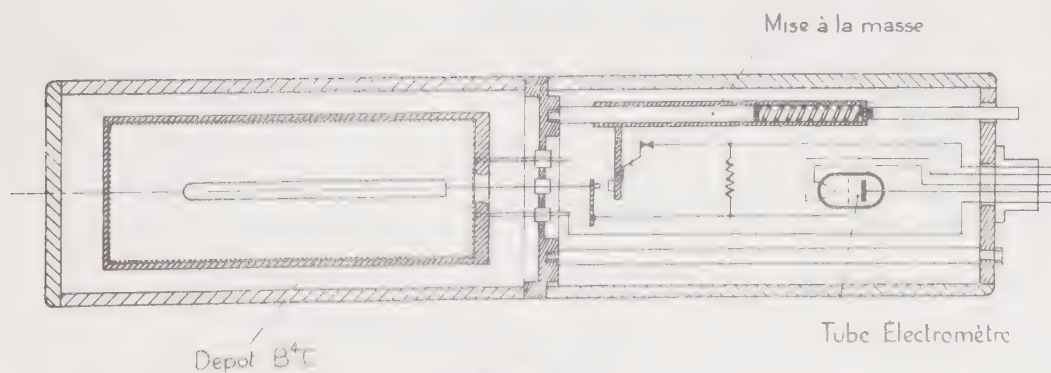


Figure 12

Chambre de démarrage à B_4C



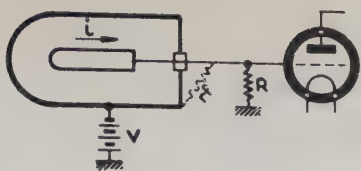


Figure 13

Montage élémentaire
d'une chambre d'ionisation

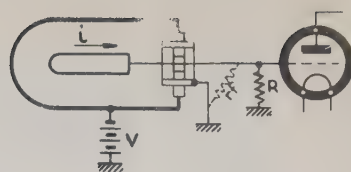


Figure 14

Utilisation d'un anneau de garde

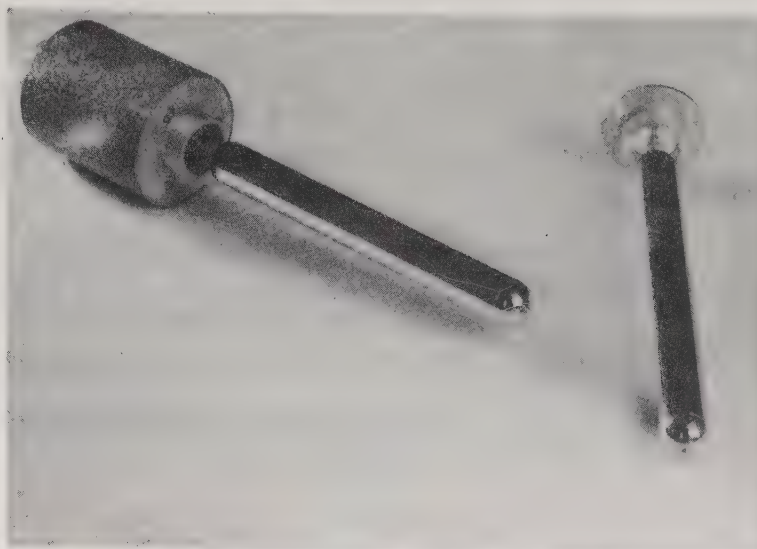


Figure 16

Vue de deux piles électrodes

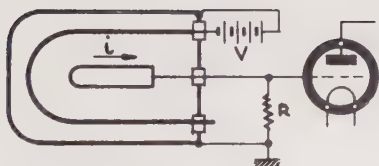


Figure 15

Utilisation d'un anneau de garde
et d'une enceinte protectrice

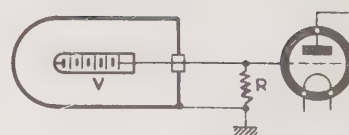


Figure 17

Montage d'une chambre d'ionisation
à l'aide d'une pile électrode

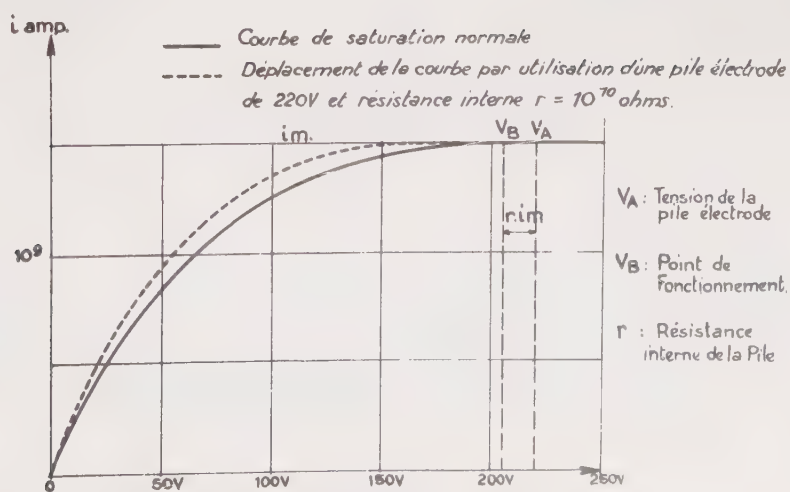


Figure 18

Variation du point de fonctionnement sur la courbe de saturation
d'une chambre d'ionisation équipée avec une pile électrode





Figure 19
Résistance de haute valeur

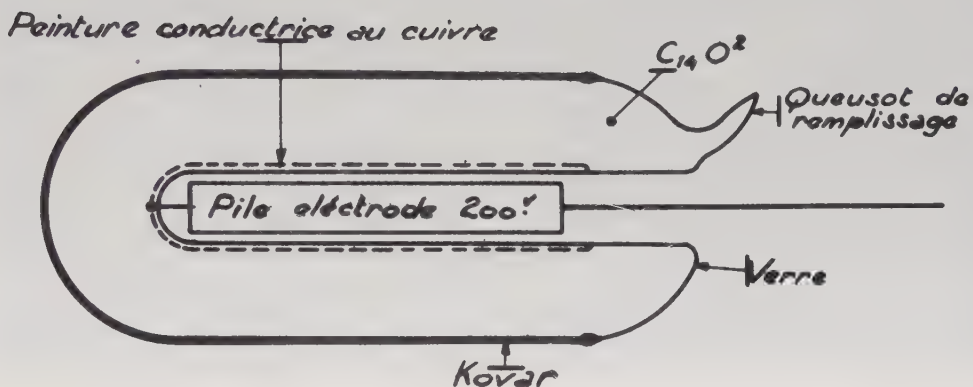


Figure 20
Chambre d'ionisation à courant constant

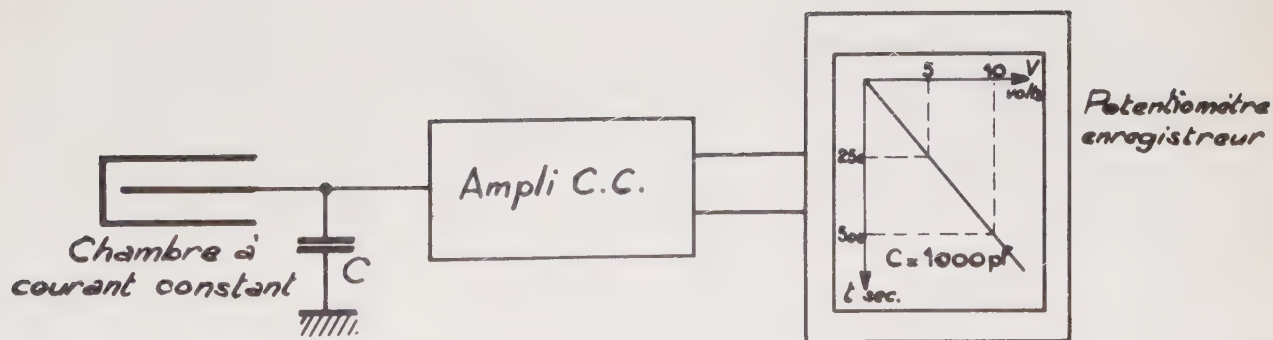


Figure 21
Etalonnage de la chambre d'ionisation
à courant constant

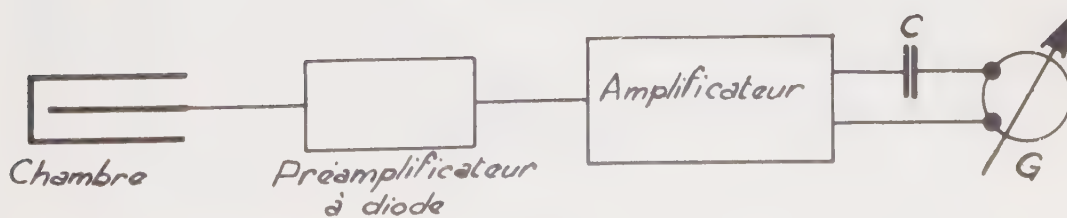
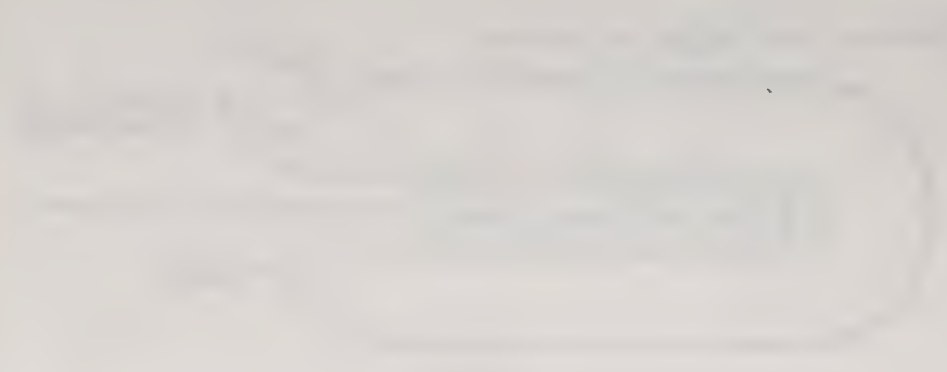


Figure 22
Schéma de la mesure de la réactivité
par amplification logarithmique



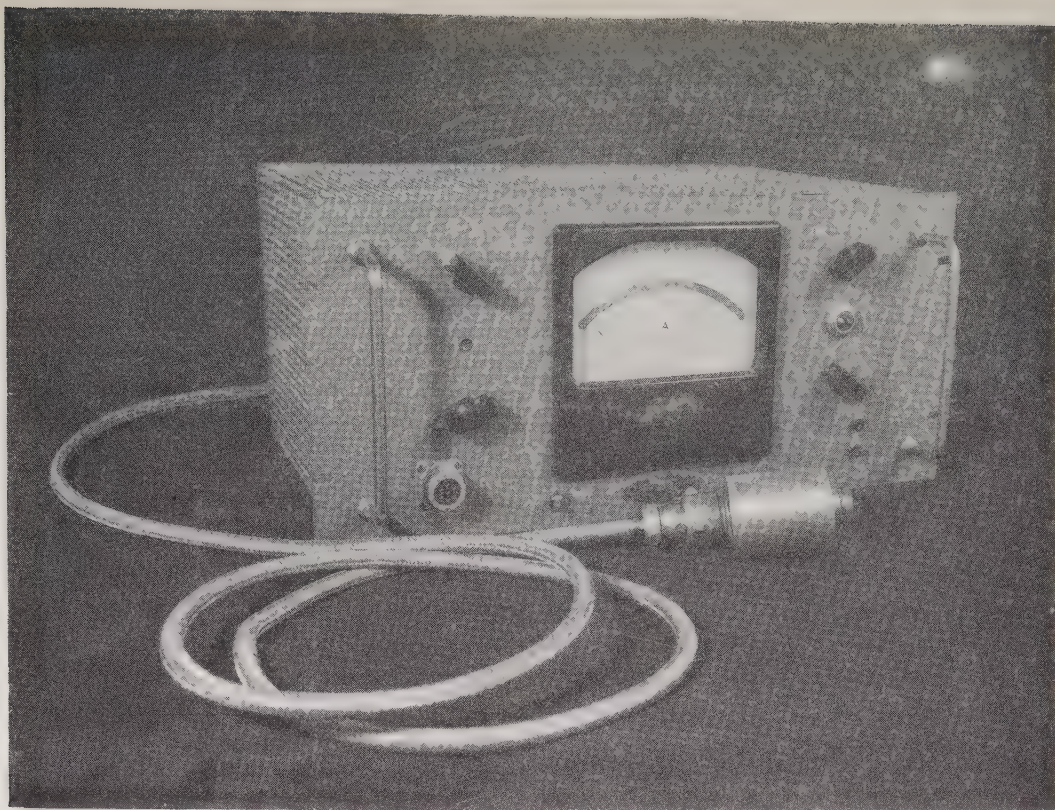


Figure 23

Vue d'un amplificateur logarithmique
et de son préamplificateur à diode

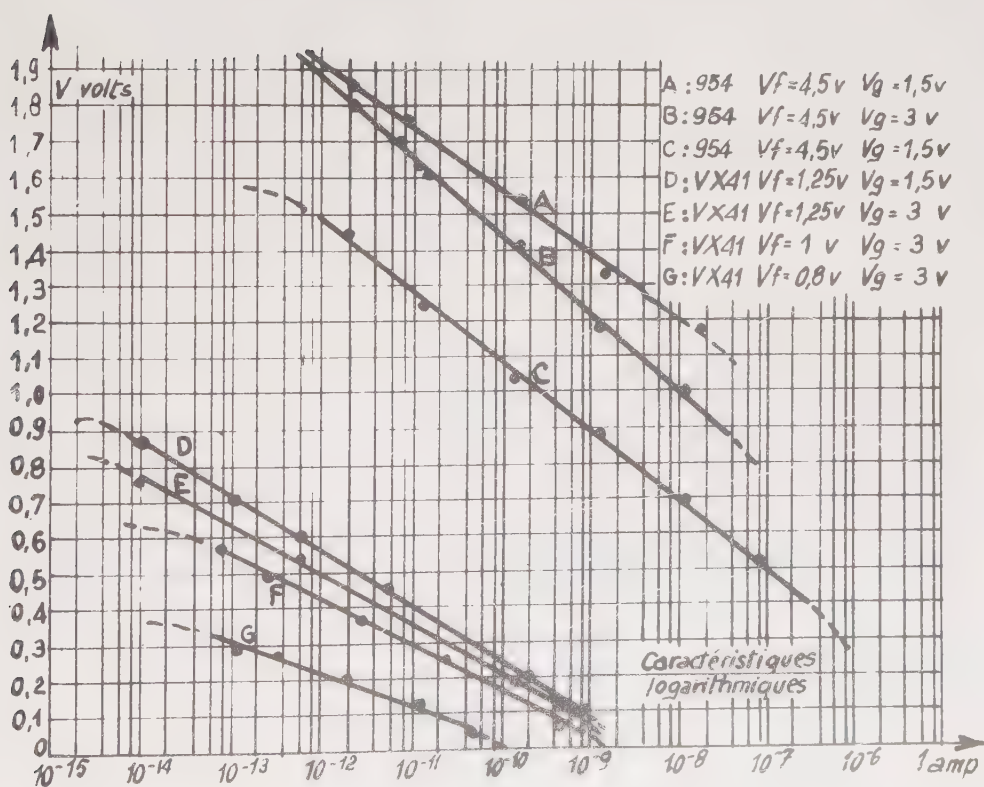


Figure 24

Caractéristiques logarithmiques de diverses diodes

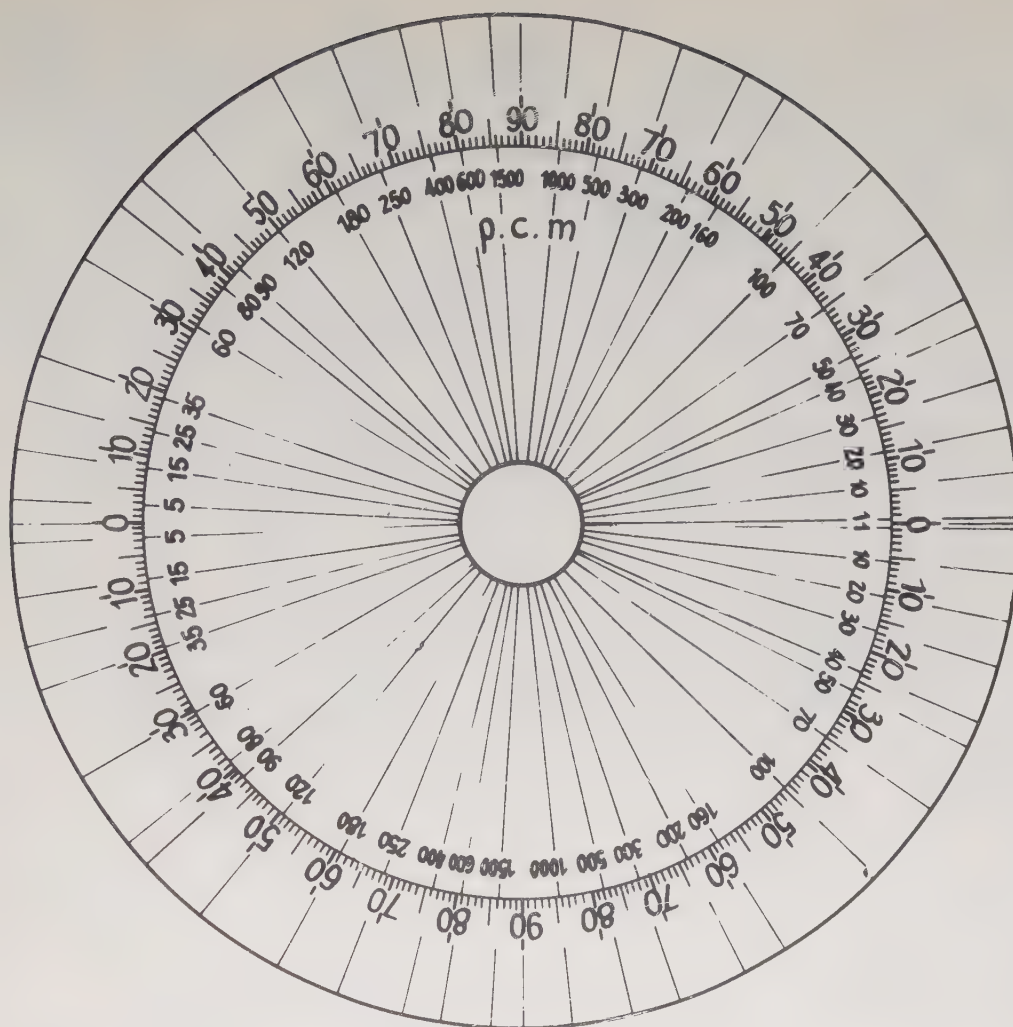


Figure 25

Echelle graduée en réactivité

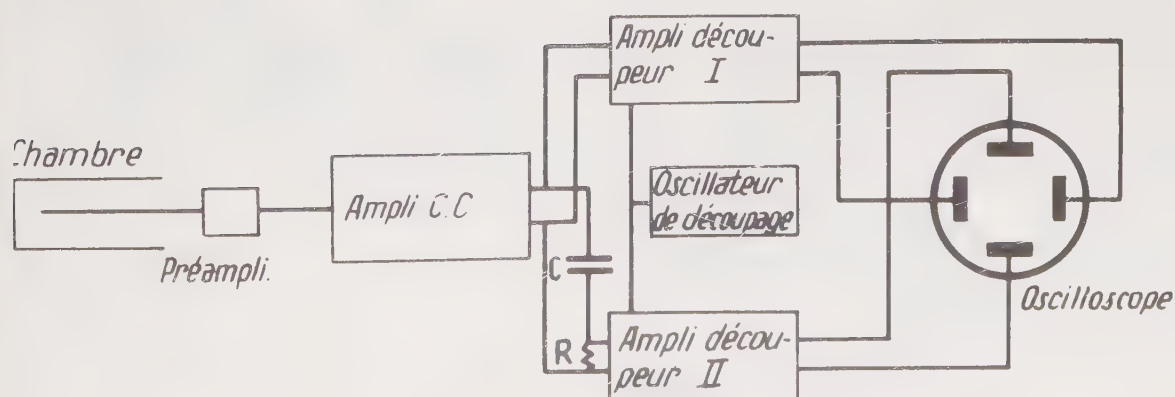


Figure 26

Montage de la méthode oscilloscopique
pour la mesure de la réactivité



Figure 28

Vue des chassis (méthode oscilloscopique)

PILE

TABLEAU

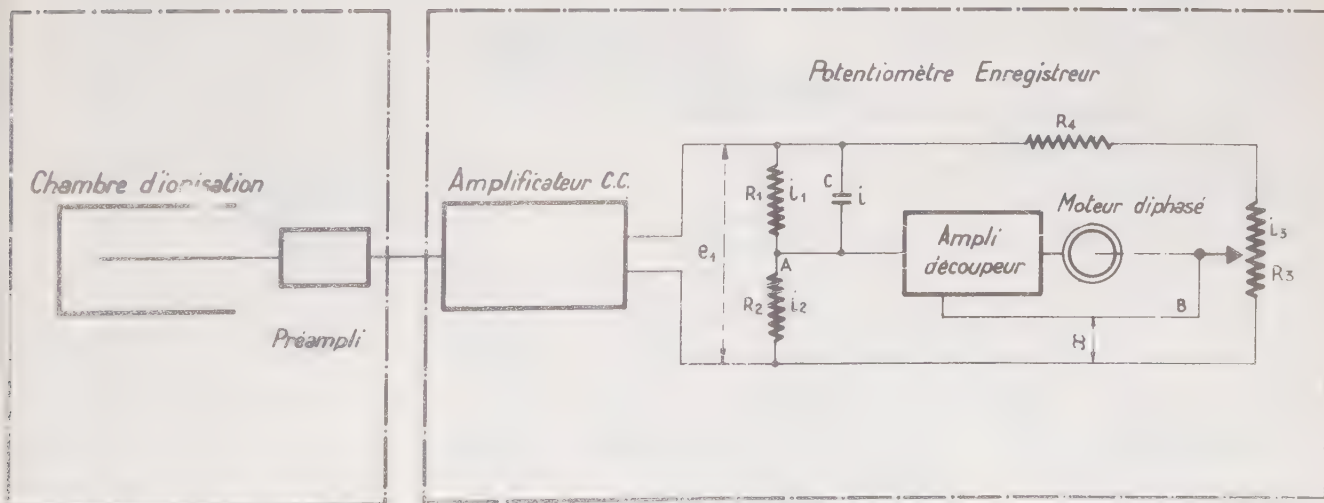


Figure 29

Schéma de la méthode potentiométrique
pour la mesure de la réactivité

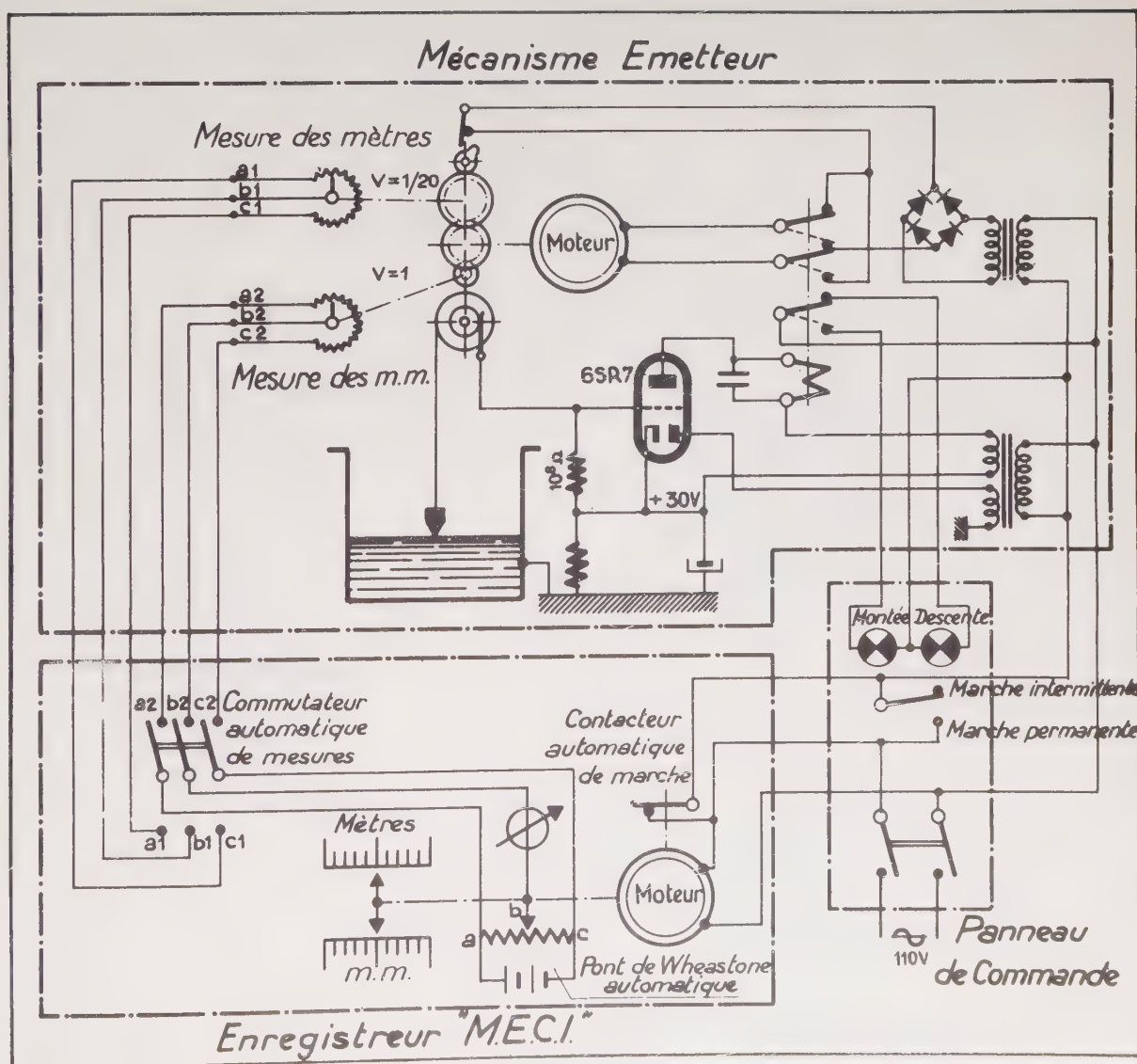


Figure 30

Schéma du dispositif du niveau d'eau lourde

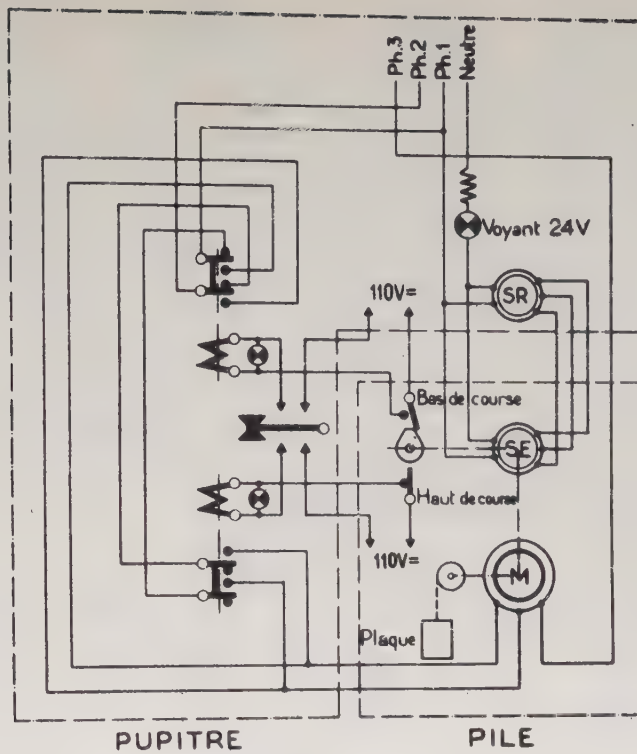


Figure 31

Servomécanisme discontinu
pour le réglage des plaques de cadmium

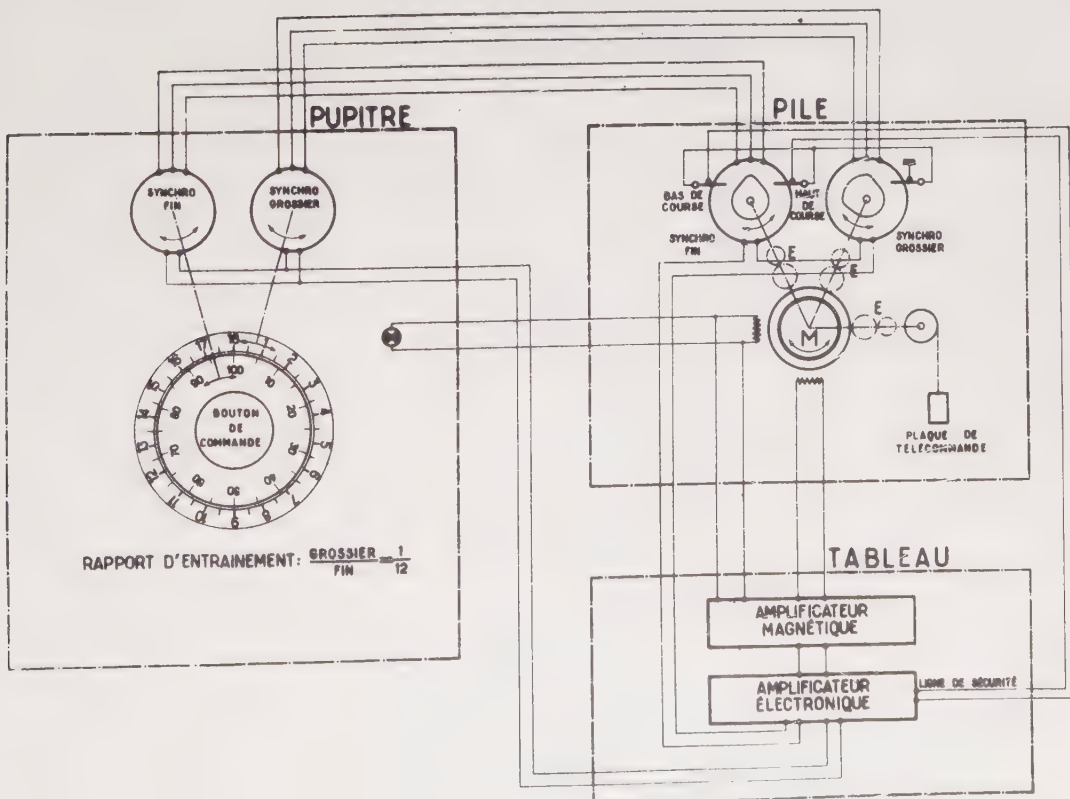


Figure 32

Servomécanisme continu
pour le réglage des plaques de cadmium

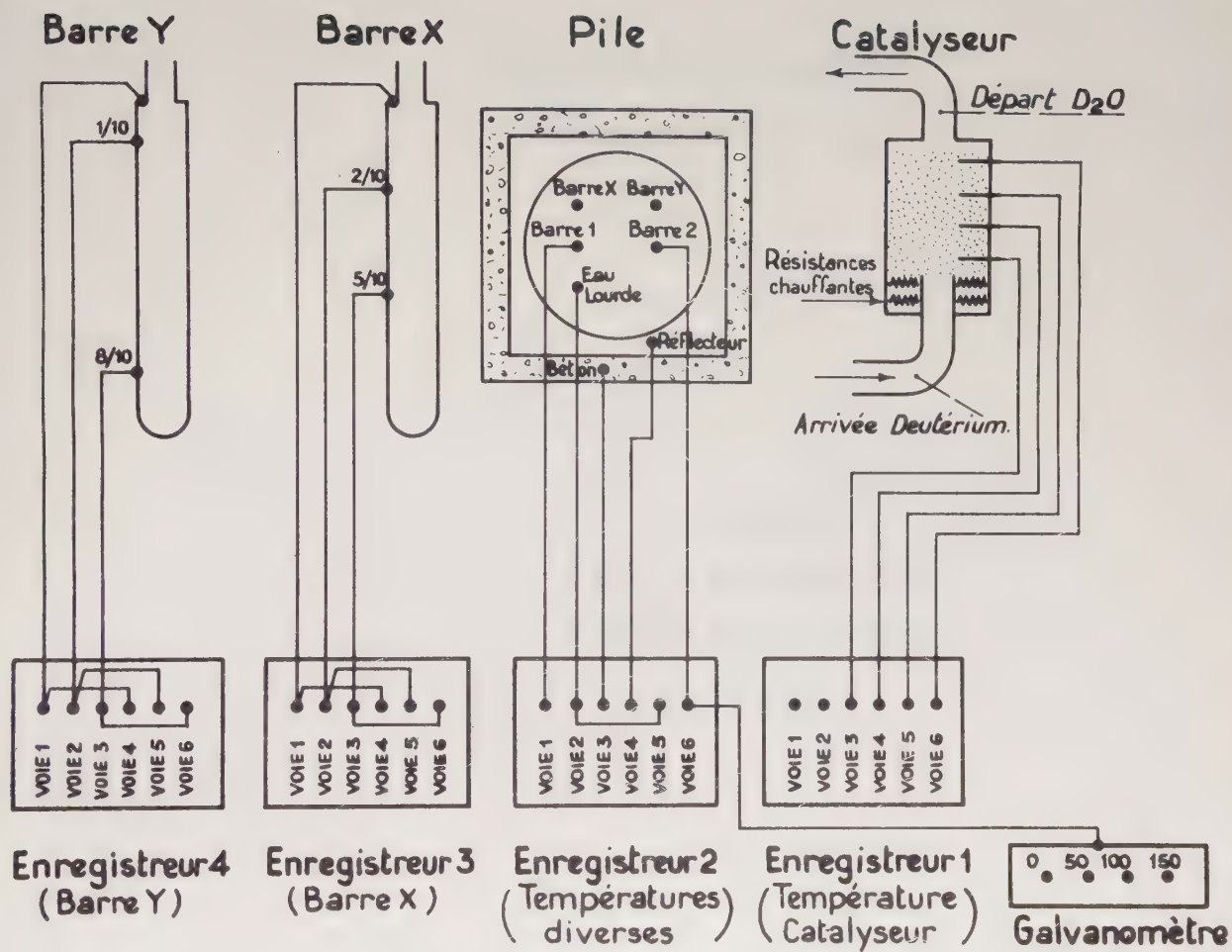


Figure 35

Mesure des températures dans le réacteur de Saclay

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

LES MACHINES A CALCULER

LE STIMULATEUR DE PILES

Vu et approuvé :

Paris, le 28 novembre 1953

Le Doyen de la Faculté des Sciences,

A. CHATELET

Vu

et Permis d'imprimer :

**Le Recteur de l'Académie
de Paris,**

Jean SARRAILH

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Nom du Candidat : WEILL

Prénom : Jacky

Date de soutenance : 2 décembre 1953

Numéro d'ordre : N° 427

WEILL (Jacky). -

Technique des contrôles des réacteurs nucléaires.

Commissariat à l'Energie atomique, Service de Documentation
1953, 77 p., 35 fig.

Th. Ing. Doc. Paris, 1953, n° 427

WEILL (Jacky). -

Technique des contrôles des réacteurs nucléaires.

Commissariat à l'Energie atomique, Service de Documentation
1953, 77 p., 35 fig.

Th. Ing. Doc. Paris, 1953, n° 427

WEILL (Jacky). -

Technique des contrôles des réacteurs nucléaires.

Commissariat à l'Energie atomique, Service de Documentation
1953, 77 p., 35 fig.

Th. Ing. Doc. Paris, 1953, n° 427

WEILL (Jacky). -

Technique des contrôles des réacteurs nucléaires.

Commissariat à l'Energie atomique, Service de Documentation
1953, 77 p., 35 fig.

Th. Ing. Doc. Paris, 1953, n° 427

